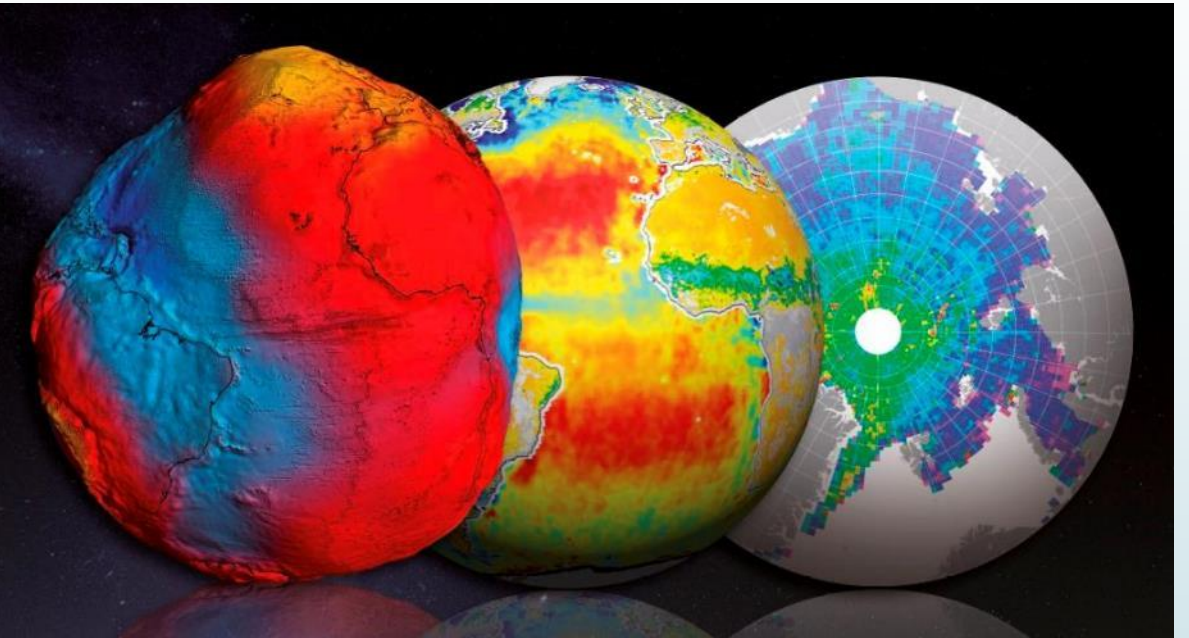


Strumentazioni geofisiche moderne

per la conoscenza
dell'interno della Terra

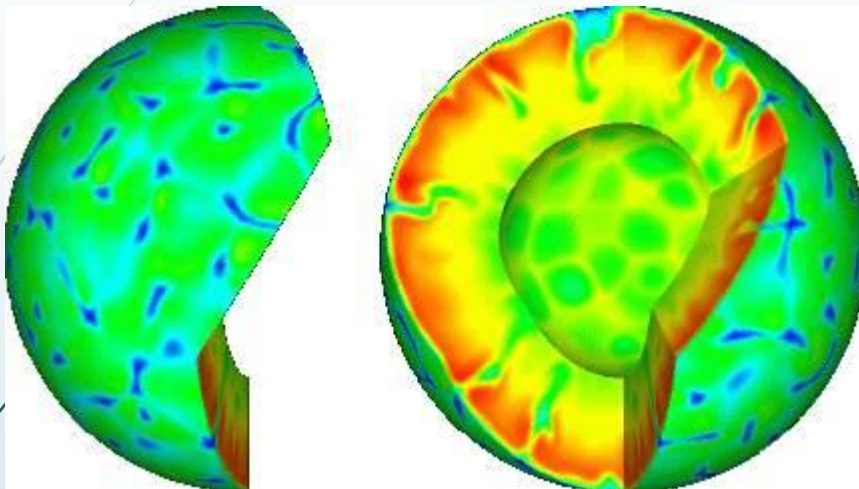
1

Raffaele Martorana
Docente di Geofisica

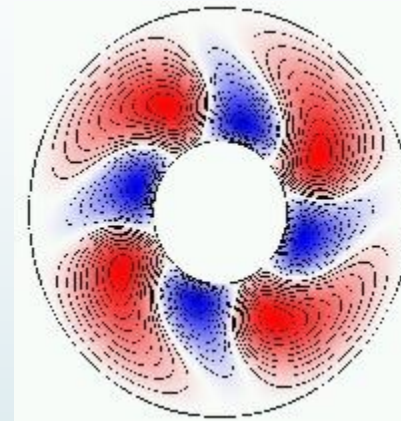


DiSTeM – Università degli Studi di Palermo

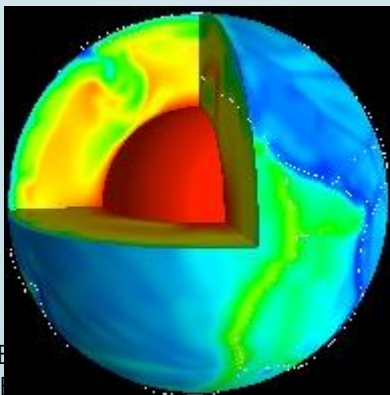
Geofisica a scala globale



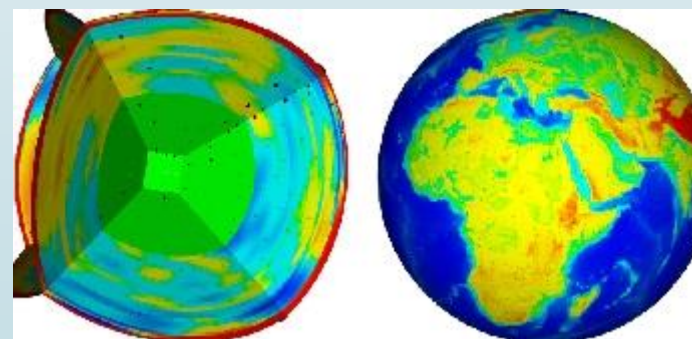
Convezione del Mantello Terrestre



Convezione Magneto-idrodinamica nel Nucleo Terrestre



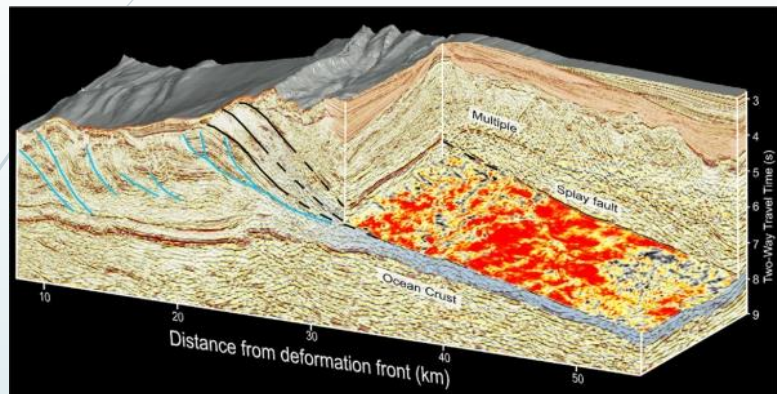
Modello Geodinamico Terrestre



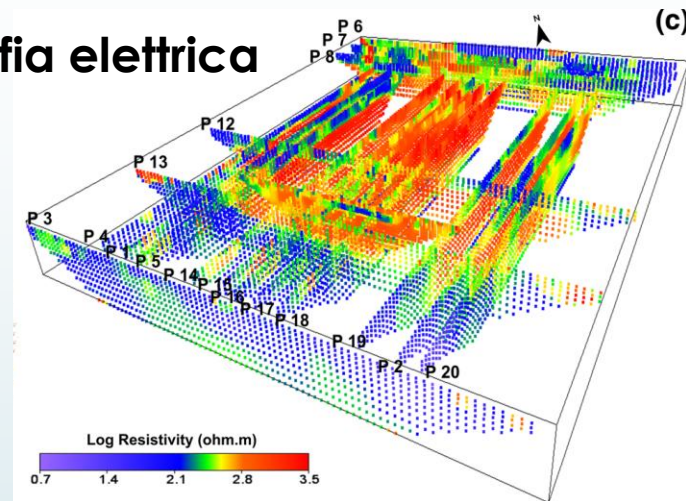
Modello della propagazione delle onde sismiche di taglio

Geofisica crostale e *near surface*

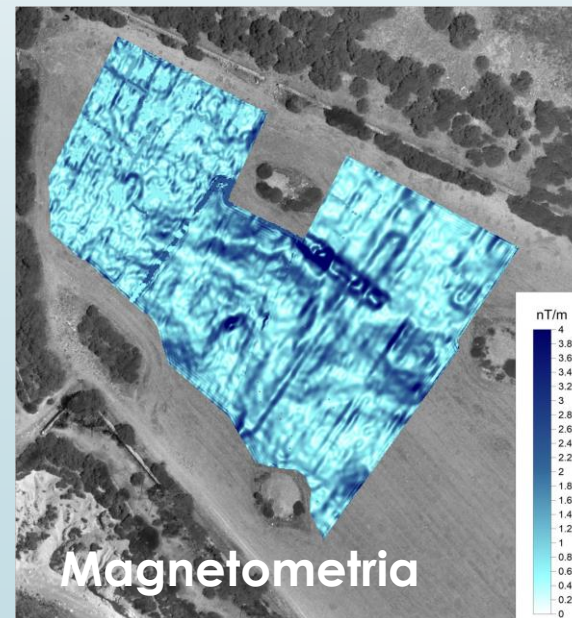
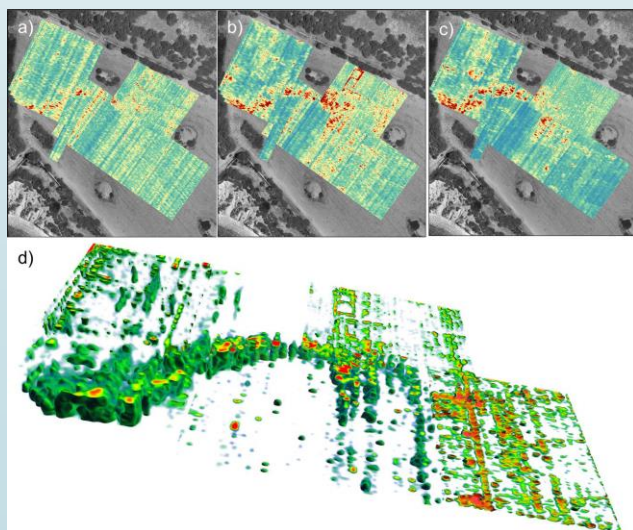
Sismica a riflessione



Tomografia elettrica



Georadar



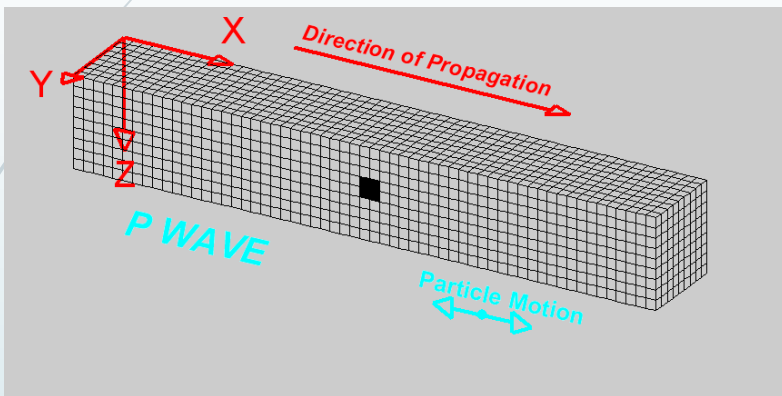
Magnetometria

GRUPPI DI METODI GEOFISICI	PARAMETRI FISICI STUDIATI	GRANDEZZE MISURATE	Energia	Attivo	Passivo	Studio della sorgente	Trasmissione	Riflessione	Rifrazione
Gravimetria	Densità	Accelerazione di gravità	Campi di potenziale	N	S	S			
Magnetometria	permeab. magnetica magnetiz. indotta magnetiz. rimanente	Intensità del campo magnetico		N	S	S			
Geoelettrica	Resistività elettrica caricabilità elettrica	Correnti elettriche Potenziali elettrici		S	S	S			
Geotermia	capacità termica conducibilità termica	Temperatura		S	S	S	S		
Sismica e Sismologia	velocità sismica impedenza sismica tempi di viaggio smorzamento	Vibrazioni elastiche	Campi d'onde	S	S	S	S	S	S
Elettromagnetismo	conducibilità elettrica costante dielettrica smorzamento	Campi elettromagnetici		S	S	S	S	S	S
Radioattività	concentrazione degli isotopi radioattivi	Numero di radiazioni	Particelle	S	S	S	S		

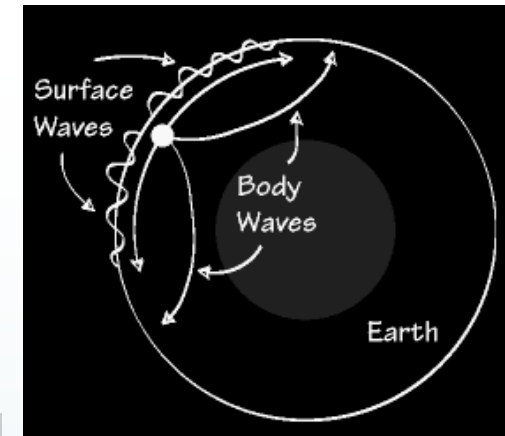
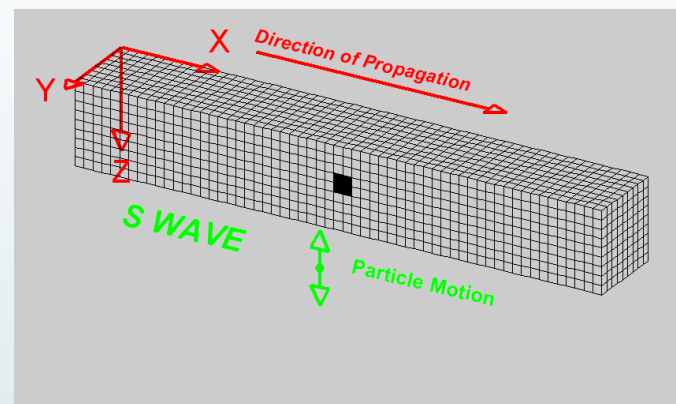
LE ONDE SISMICHE

Onde di volume (body waves)

Onde di compressione (P)



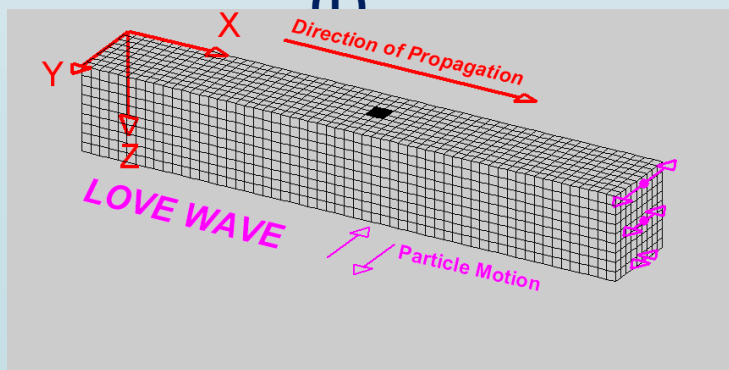
Onde di taglio (S)



Onde di superficie (surface waves)

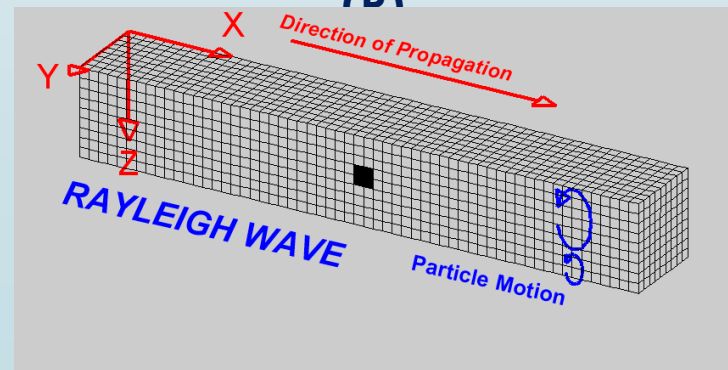
Onde di Love

(L)

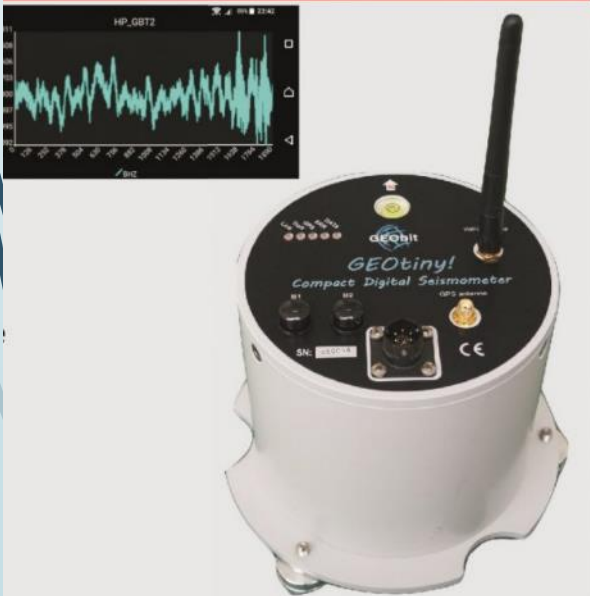
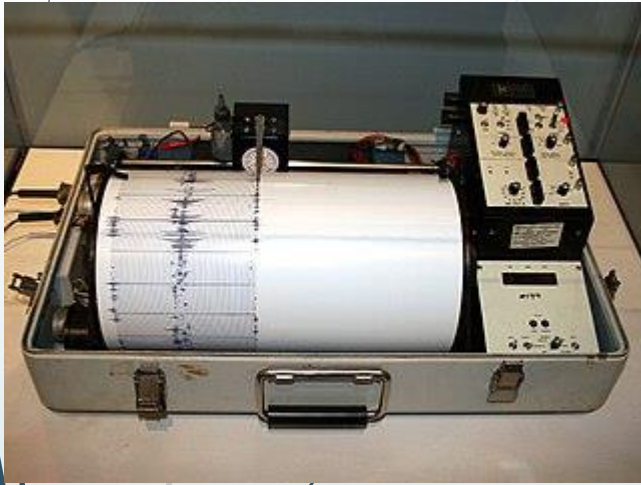


Onde di Rayleigh

(R)

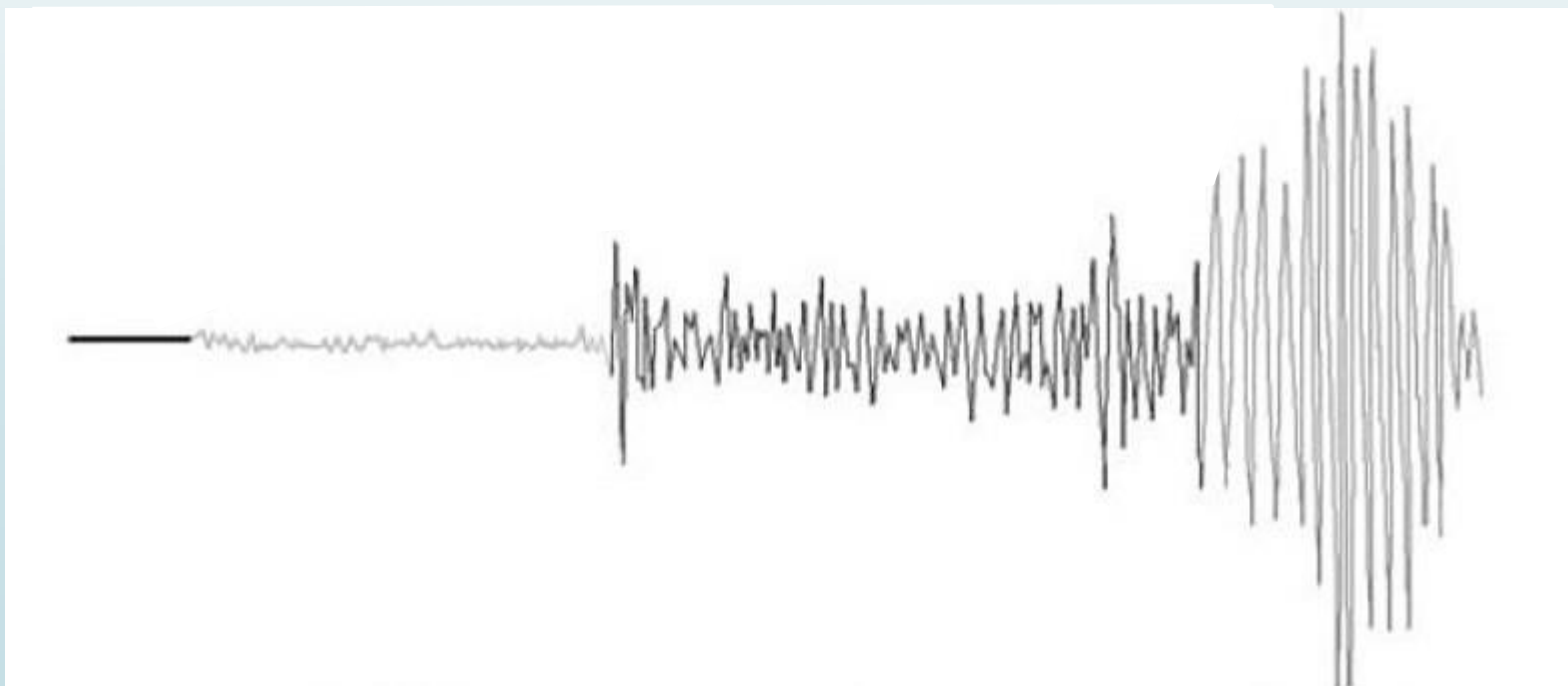


Il Sismometro

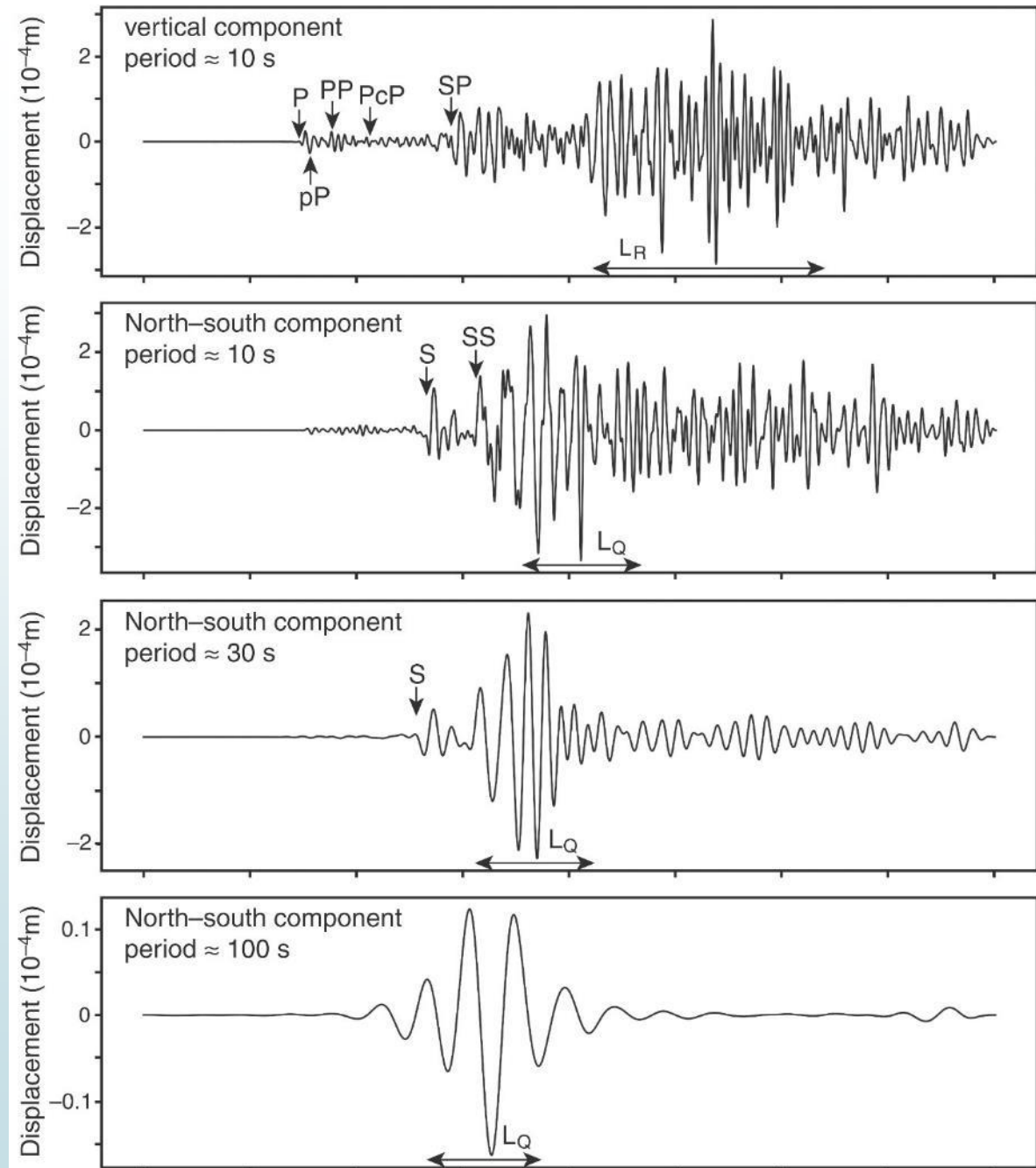


Cosa viene misurato da un sismometro?

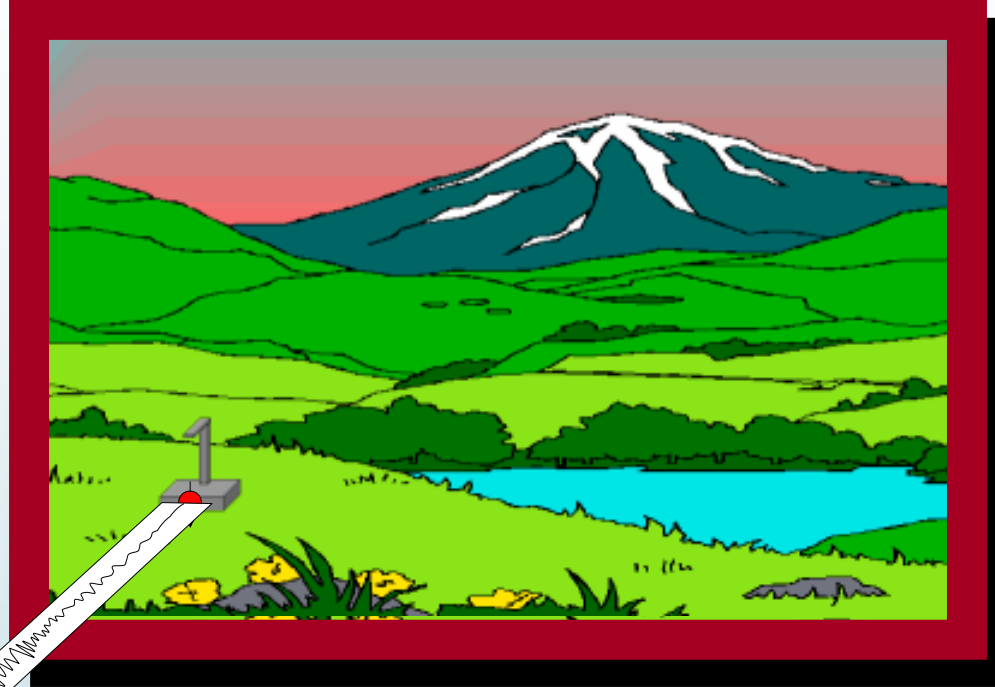
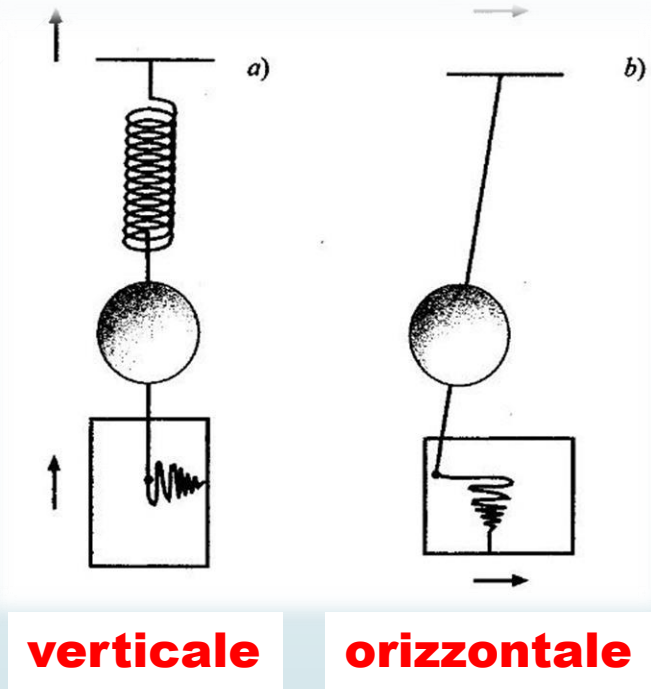
- Il fenomeno fisico osservato è **l'oscillazione** del suolo
- La grandezza fisica fondamentale che varia è lo **spostamento** del suolo **$s(t)$** .
- In alternativa si possono misurare le sue derivate temporali, cioè la **velocità** **$v(t)$** e l'**accelerazione** **$a(t)$** del suolo.



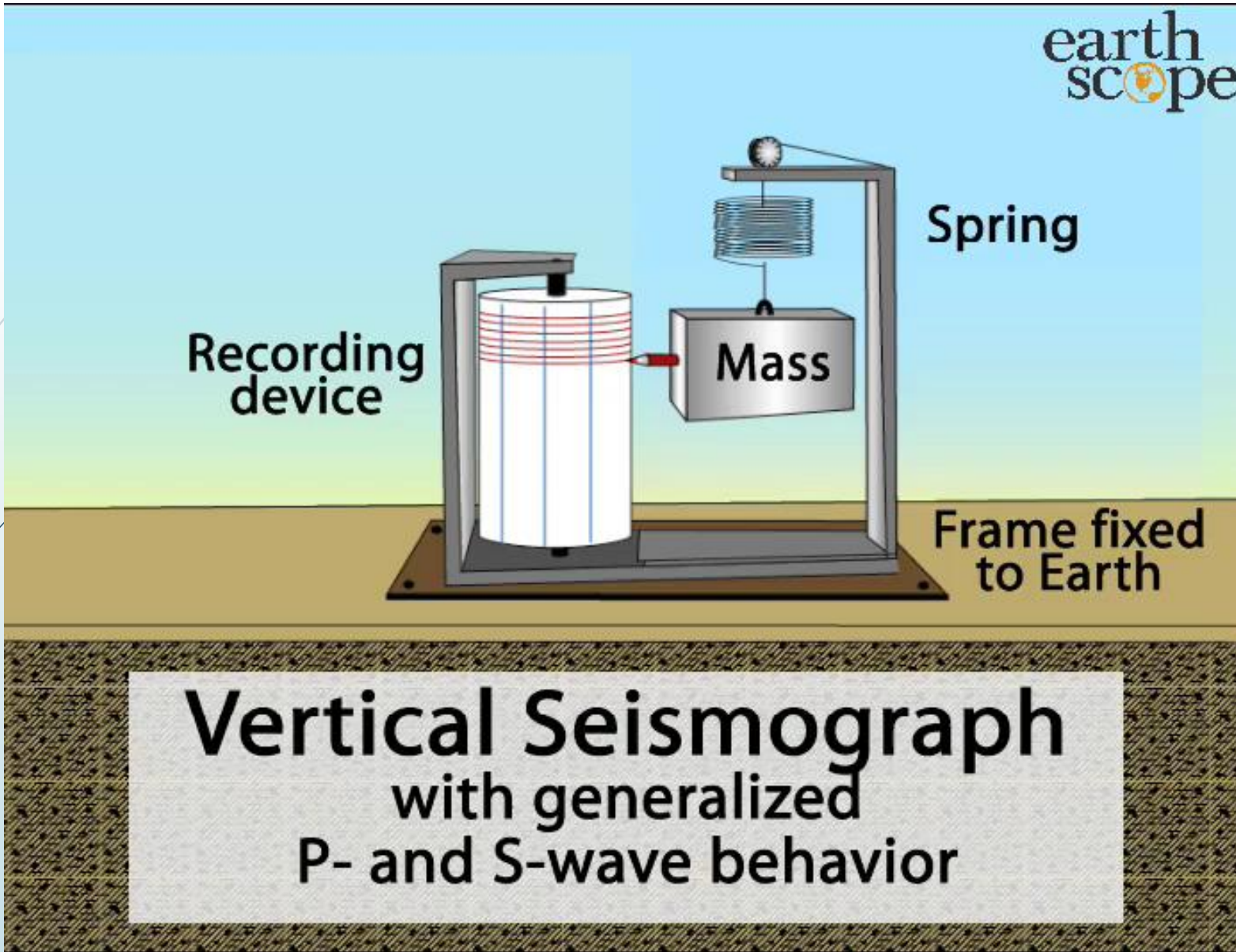
Sismogramma di un terremoto: componenti



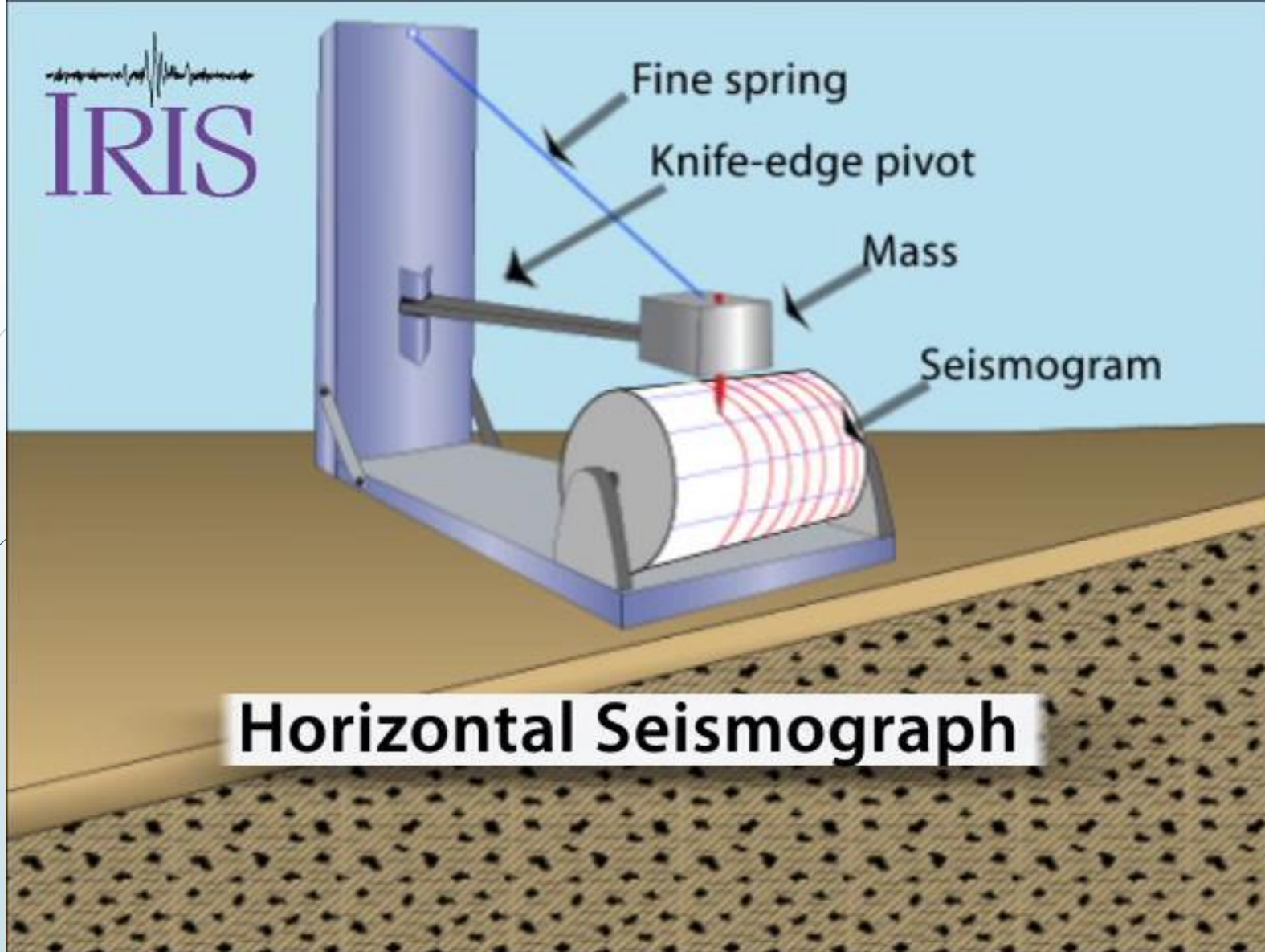
Principio di funzionamento del sismometro a pendolo



- Il funzionamento del sismometro è basato sul principio del pendolo, costituito da una massa che per la sua inerzia tende a rimanere relativamente immobile durante l'evento sismico.
- Lo strumento deve contenere un dispositivo di smorzamento in modo che le oscillazioni proprie della massa non si sovrappongano al moto del suolo.



https://youtu.be/go-paKEF_bk

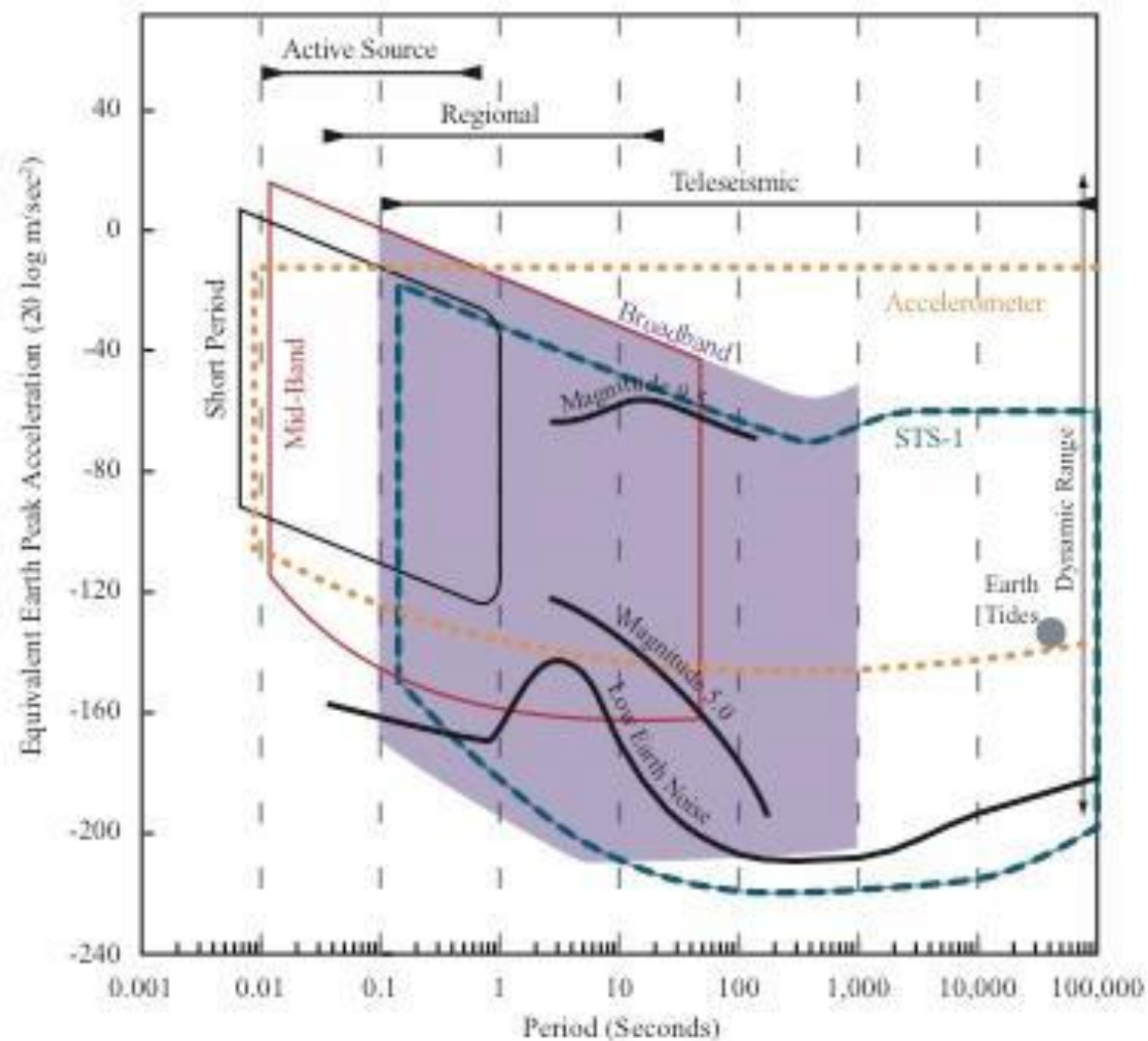


<https://youtu.be/83GOKn7kWXM>

Sensori sismici e periodo d'oscillazione

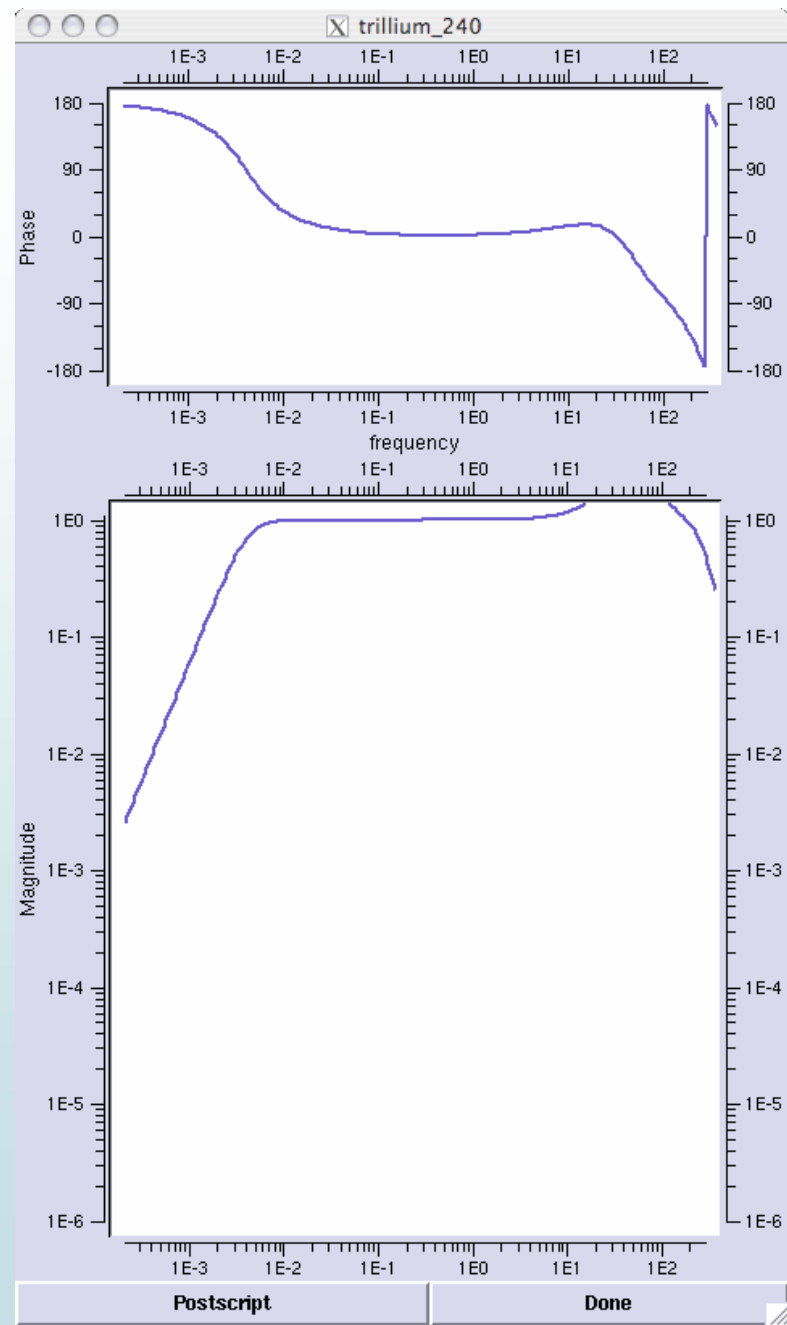
La **risposta di un sensore** è la relazione tra il movimento del terreno (input) e il segnale elettrico (output)

La **frequenza di funzionamento** è la frequenza che produce l'output di massima ampiezza



Sensori a banda larga (broadband)

- ▶ da 0.01 Hz a 25Hz circa
- ▶ Nanometrics Trillium 240 Broadband Sensor



Sismometri a corto periodo

► da 1 Hz a 100 Hz



top: **LE-3D** "classic"

right: **LE-3D**lite, **LE-1D/V**

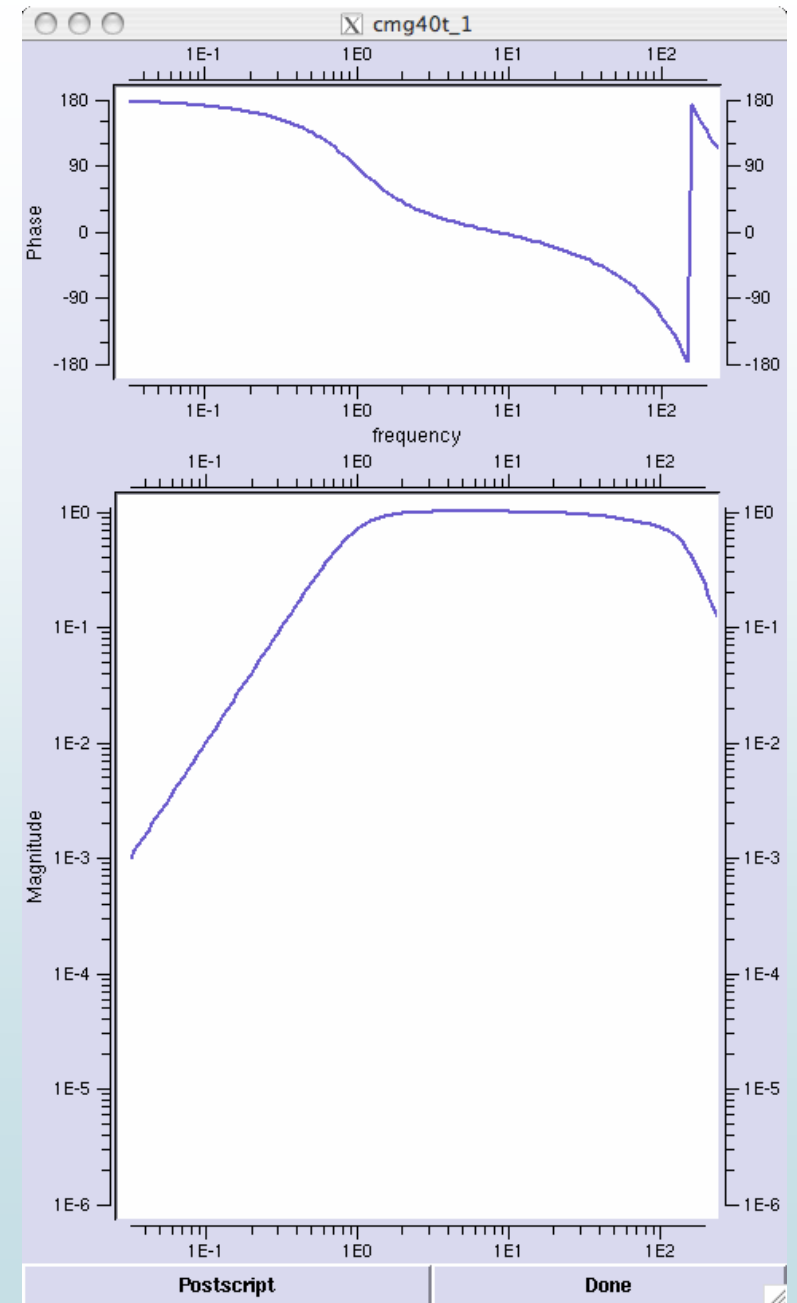


top: **LE-3D**lite MkII

bottom: **LE-3D** Borehole



- Risposta di sito.
- Strutture cristalli.
- Studi vulcanici.
- Studi glaciologici.



Sensori ad alta frequenza (geofoni) studi con sorgenti attive

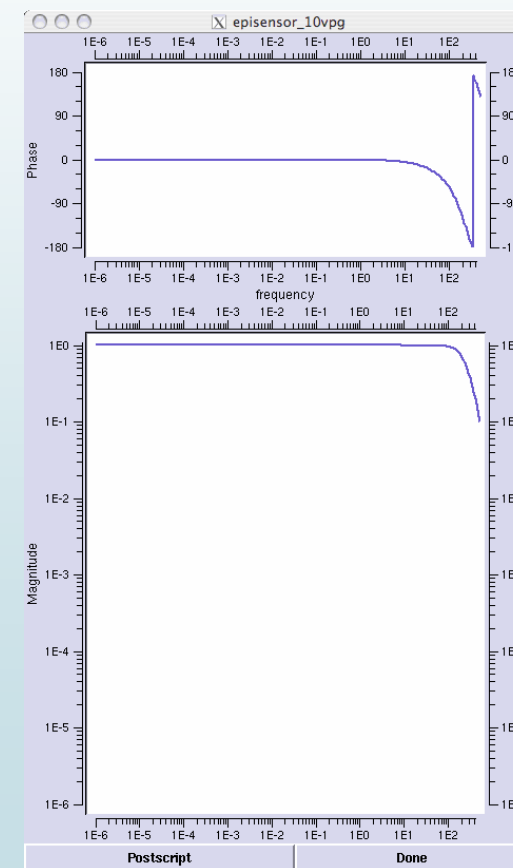
► Da 4.5 Hz a 600 Hz circa



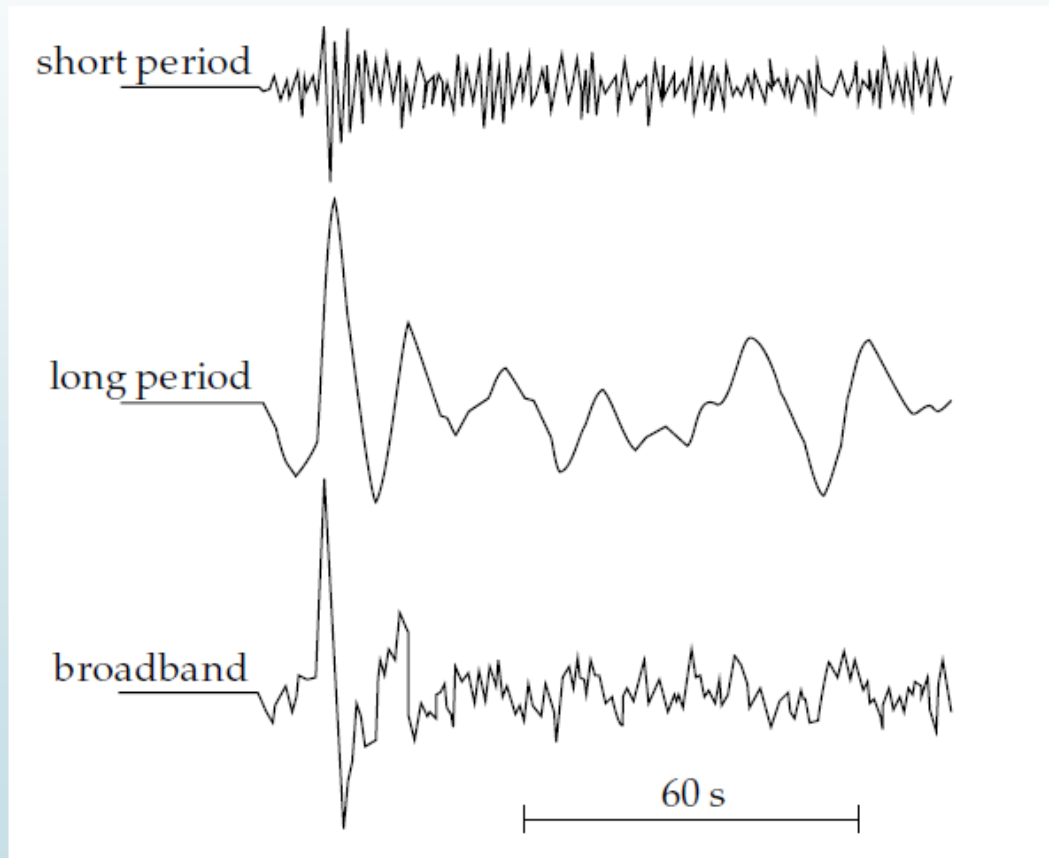
Accelerometri



Kinometrics
Episensor ES-T
Accelerometer

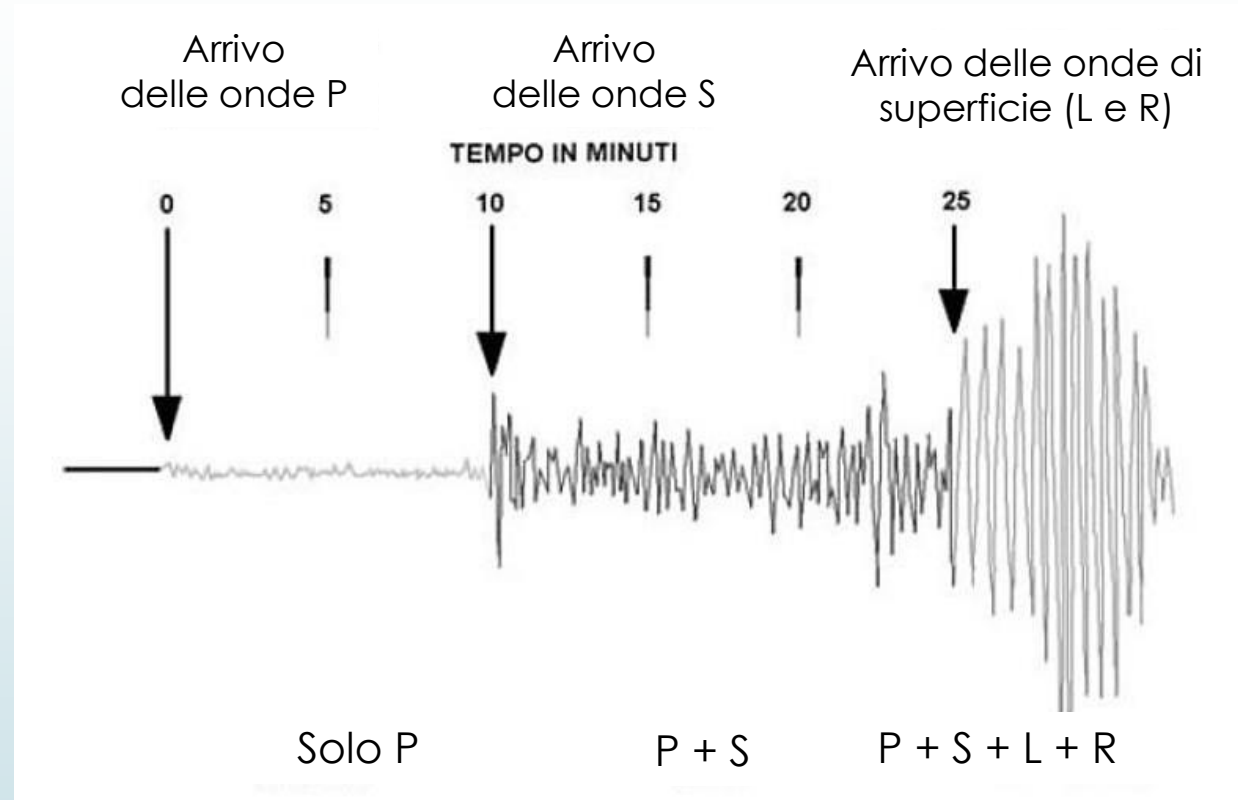


Sismogrammi: corto periodo, lungo periodo, larga banda

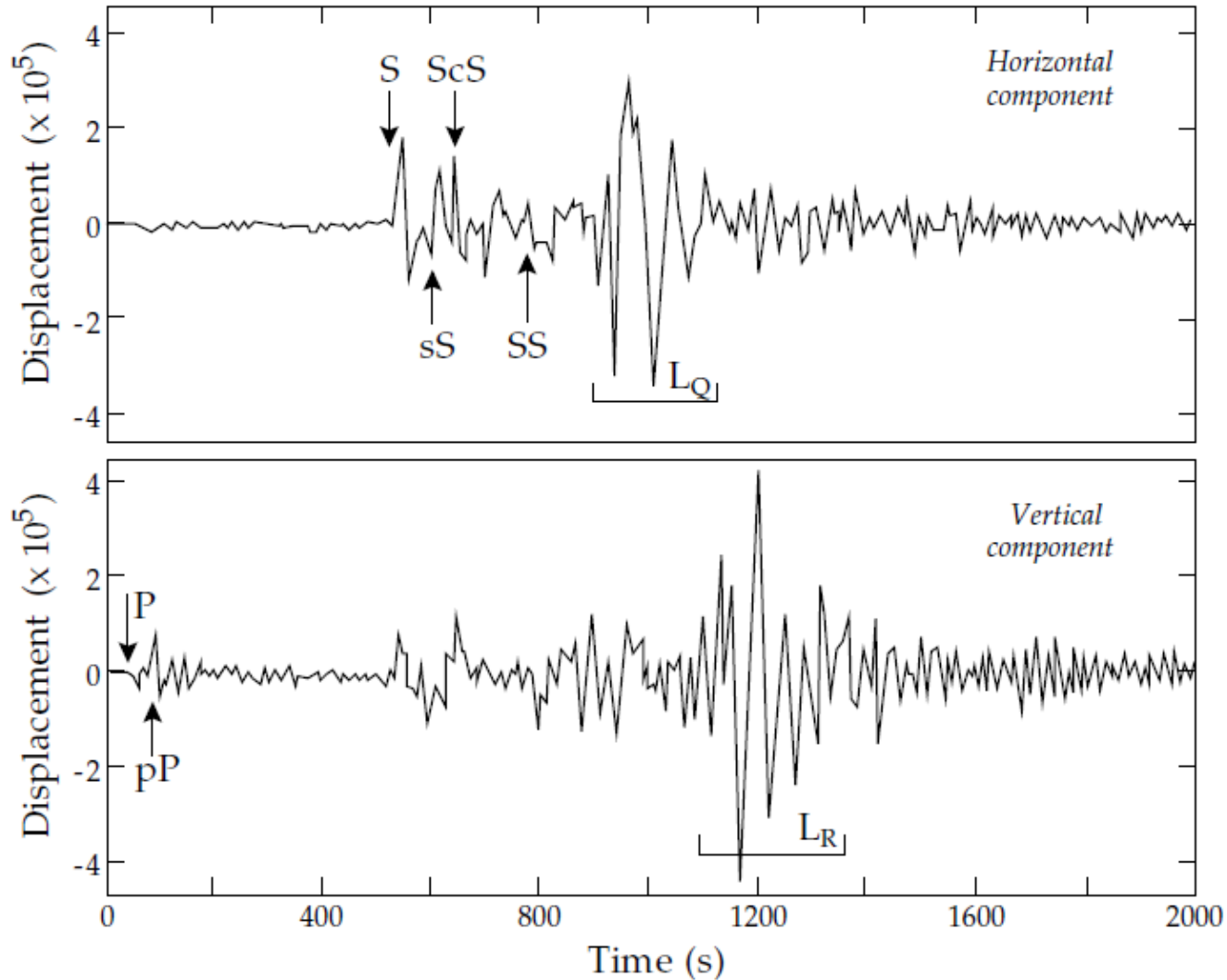


Sismogramma di un terremoto

17

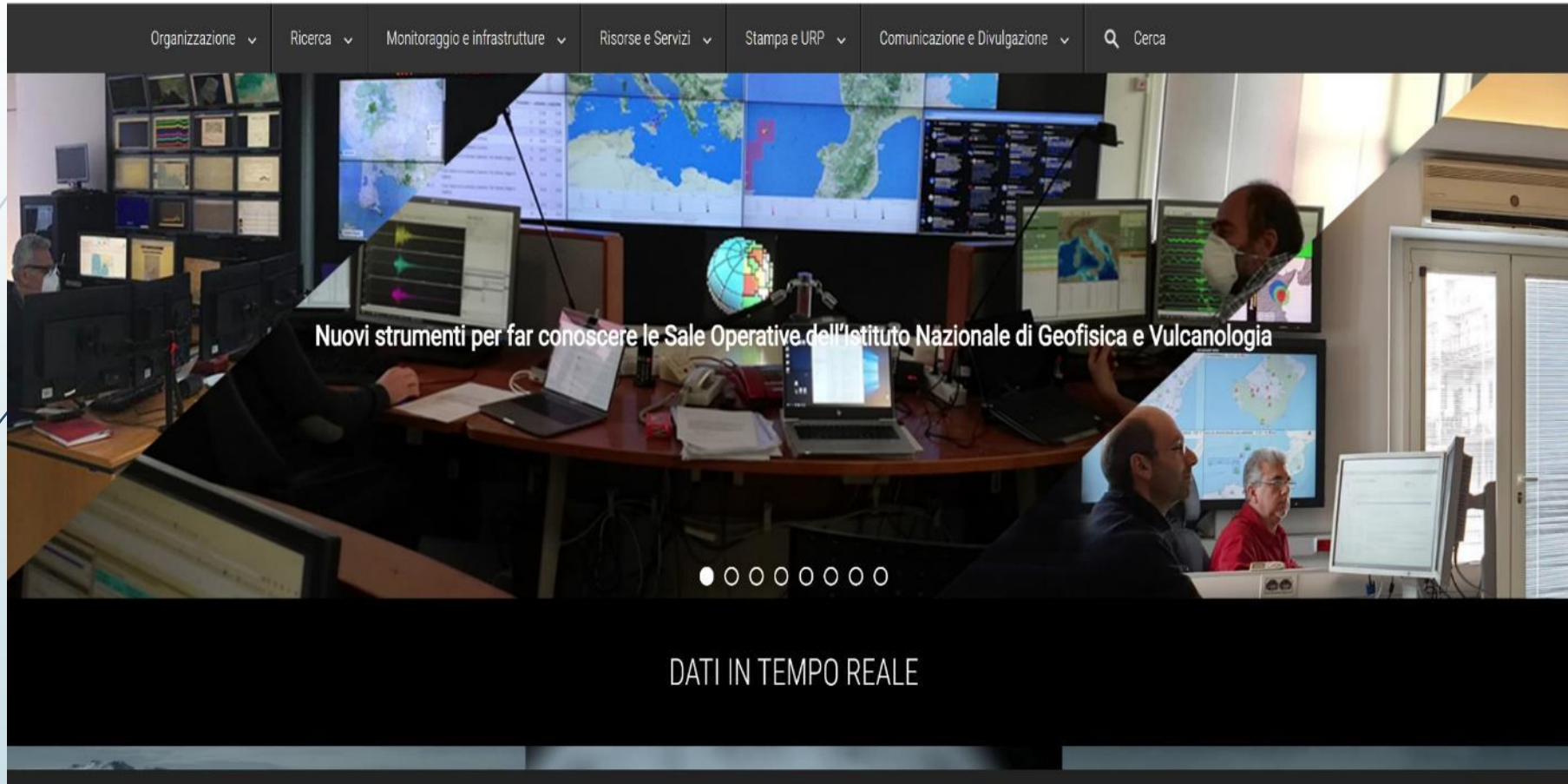


Sismogrammi a larga banda



Guralp CMG-3T
Broadband Sensor

La Rete Sismica Nazionale dell'INGV

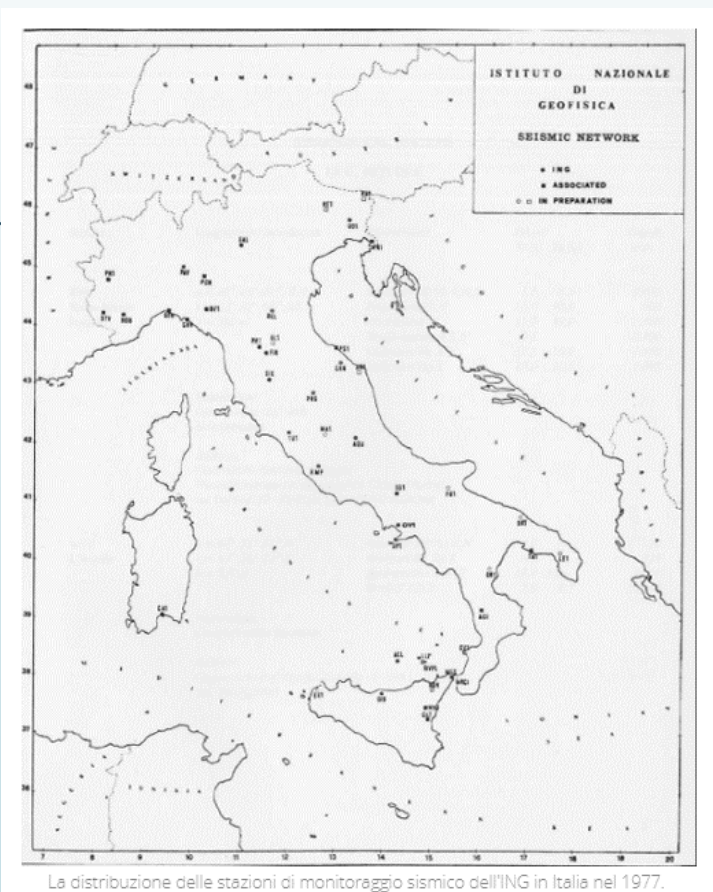


ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

www.ingv.it

Il monitoraggio sismico prima del 1980

- Il monitoraggio sismico del territorio italiano fino al 1980, anno del catastrofico terremoto in Irpinia, era realizzato presso Stazioni e Osservatori locali, distribuiti in Italia e gestiti da vari Enti pubblici o privati (di Ricerca, Università, Fondazioni, Musei, ecc.), già esistenti dall'inizio del secolo



Immagini dei primi del Novecento di alcuni Osservatori sismologici operativi in Italia: sede storica dell'Osservatorio Vesuviano (in alto a sx), Osservatorio del Collegio dell'Opera Pia "Alberoni" di Piacenza (in alto a dx), Osservatorio Meteorico e Geodinamico del Comizio Agrario di Reggio Calabria (in basso a dx), Regio Osservatorio Geofisico di Pavia (in basso a sx).

La Rete Sismica Nazionale negli anni '80, la centralizzazione

Dopo il terremoto in Umbria del 1980, crebbe l'esigenza di disporre di un sistema di monitoraggio e sorveglianza a livello nazionale.

Nacque così la **Rete Sismica Nazionale Centralizzata (circa 30 stazioni)**.

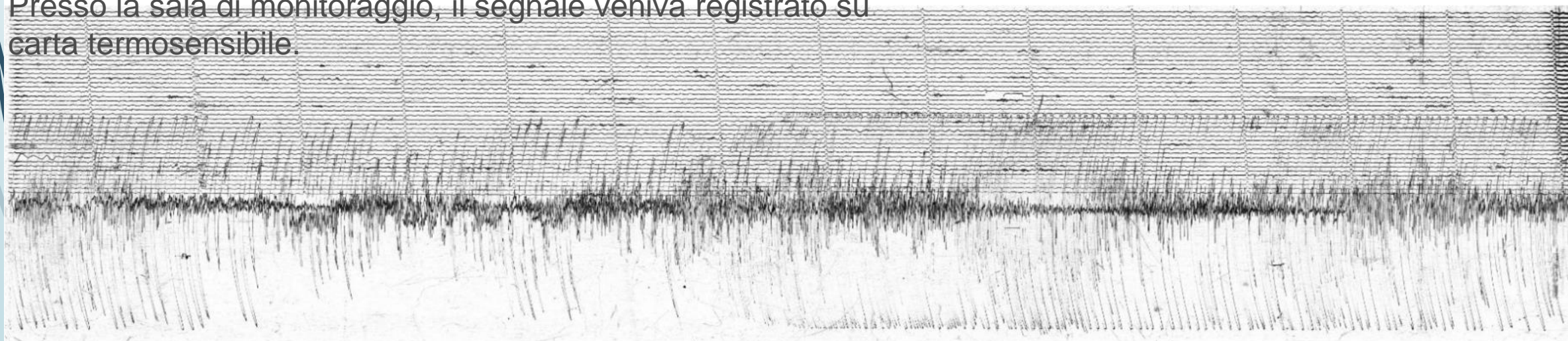
Sismometri verticali a corto periodo

Il segnale era trasmesso in telemetria attraverso linea telefonica dedicata o mediante ponti radio militari.

Presso la sala di monitoraggio, il segnale veniva registrato su carta termosensibile.



Sala di sorveglianza sismica dell'ING presso la sede di Via di Ville Ricotti a Roma.



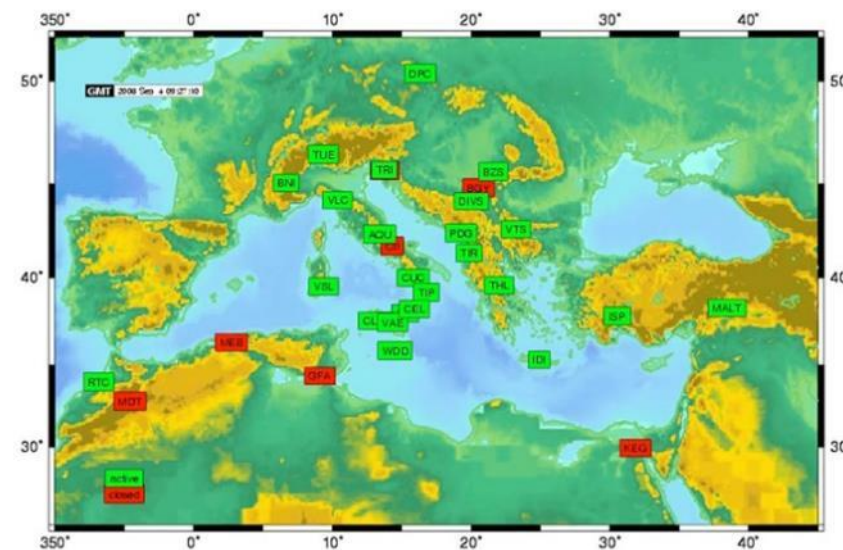
Sismogramma del terremoto delle 19:34 del 23 novembre 1980 registrato alla stazione sismica dell'ING di Duronia in provincia di Campobasso.

La nascita della Rete MEDNET e della tecnologia digitale

- I sensori sismici di tipo elettronico.
- Sistemi di conversione analogico/digitale
- prime stazioni sismografiche digitali.
- **Prima rete digitale a banda larghissima**
(*Very Broad Band*).



Sensore velocimetrico Geotech S-13 (associato alla vecchia strumentazione analogica) e sensore velocimetrico Lennartz LE-3D/5s (associato alla nuova stazione digitale) installati presso la stazione di BRMO, Bormio (SO) dell'ING. La stazione rappresenta una delle prime stazioni digitali con strumentazione sviluppata presso i laboratori dell'ING (acquirente GAIA).



Distribuzione delle stazioni della Rete MedNet alla fine degli anni '90.

Lo sviluppo della Rete negli anni 2000



- l'ING comunicava al Dipartimento di Protezione Civile i **parametri del terremoto** (coordinate, tempo origine, profondità e magnitudo) e la lista dei comuni coinvolti.
- prime **stazioni digitali** con sensori triassiali attivi,
- l'ING confluì nel grande INGV
- **stazioni e reti digitali** all'avanguardia,
- **la trasmissione dei dati via satellite.**



Stazione della RSN di SFI-Santa Sofia (FC): in alto a sx esterno della stazione con la parabola per la trasmissione dati, a dx la strumentazione GAIA, in basso a sx l'apparato, presente nei laboratori INGV di Roma, con cui vengono effettuati i test sugli acquirenti GAIA prima dell'installazione.

Le stazioni di monitoraggio multiparametriche



Stazione multiparametrica di LPEL-Lama dei Peligni (CH): sul pinto in cemento è stato installato, oltre al velocimetro e all'accelerometro, un misuratore di radon.

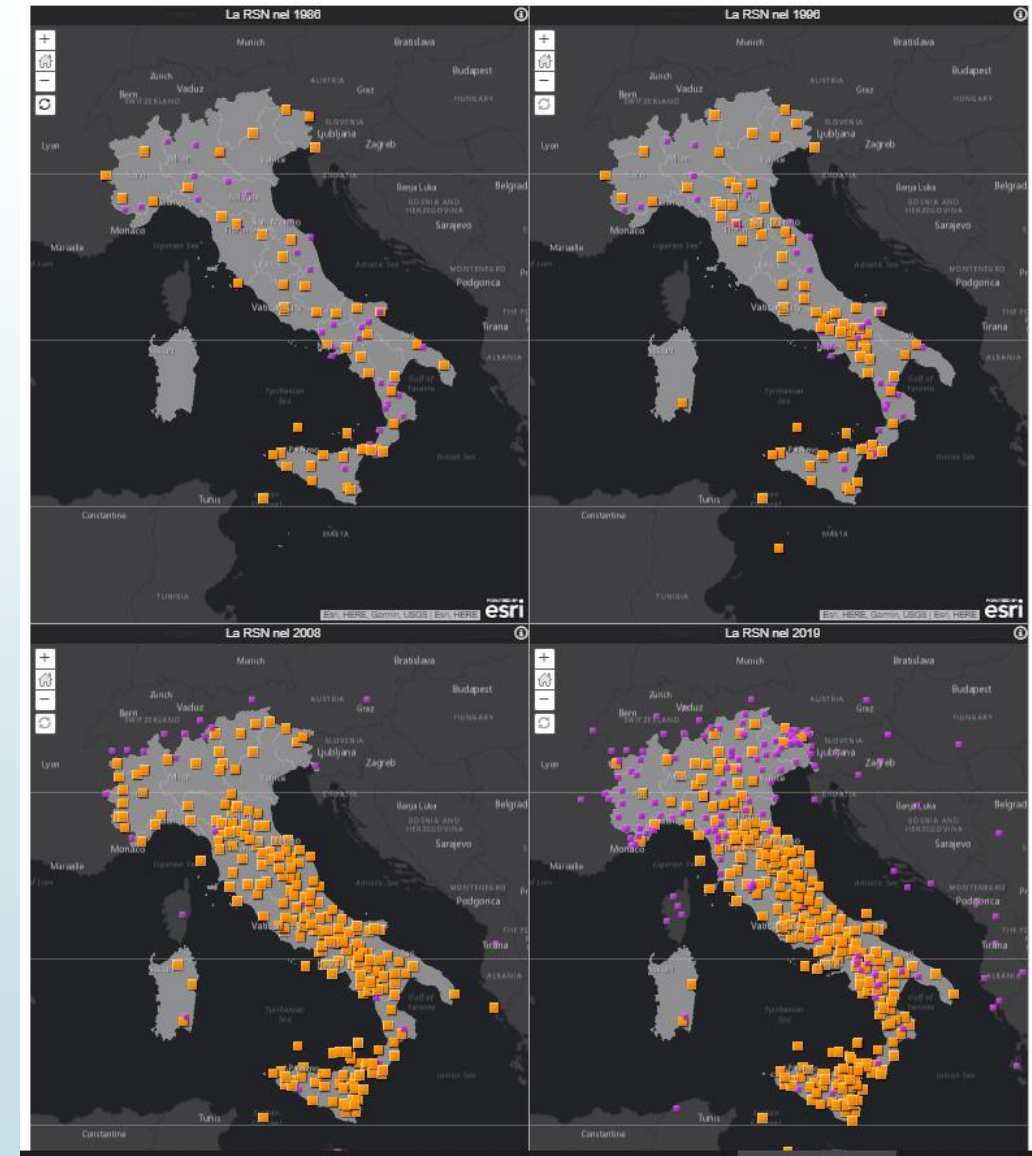


A destra un esempio di stazione multiparametrica della Rete Sismica Nazionale. A sinistra un tripode con l'antenna GPS installato presso la stazione CORL-Corleone (PA).

- Le stazioni, che prima trasmettevano solo dati sismici, oggi trasmettono anche altri dati come **l'accelerazione del suolo** e i **piccolissimi spostamenti dovuti alle deformazioni lente**.
Questi ultimi rilevati tramite **GPS geodetici** ad altissima risoluzione.
- Recentemente, in alcuni siti della RSN, è stata aggiunta **l'acquisizione dei dati relativi alla**

Dal 1986 ad oggi: La Rete Sismica Nazionale Integrata

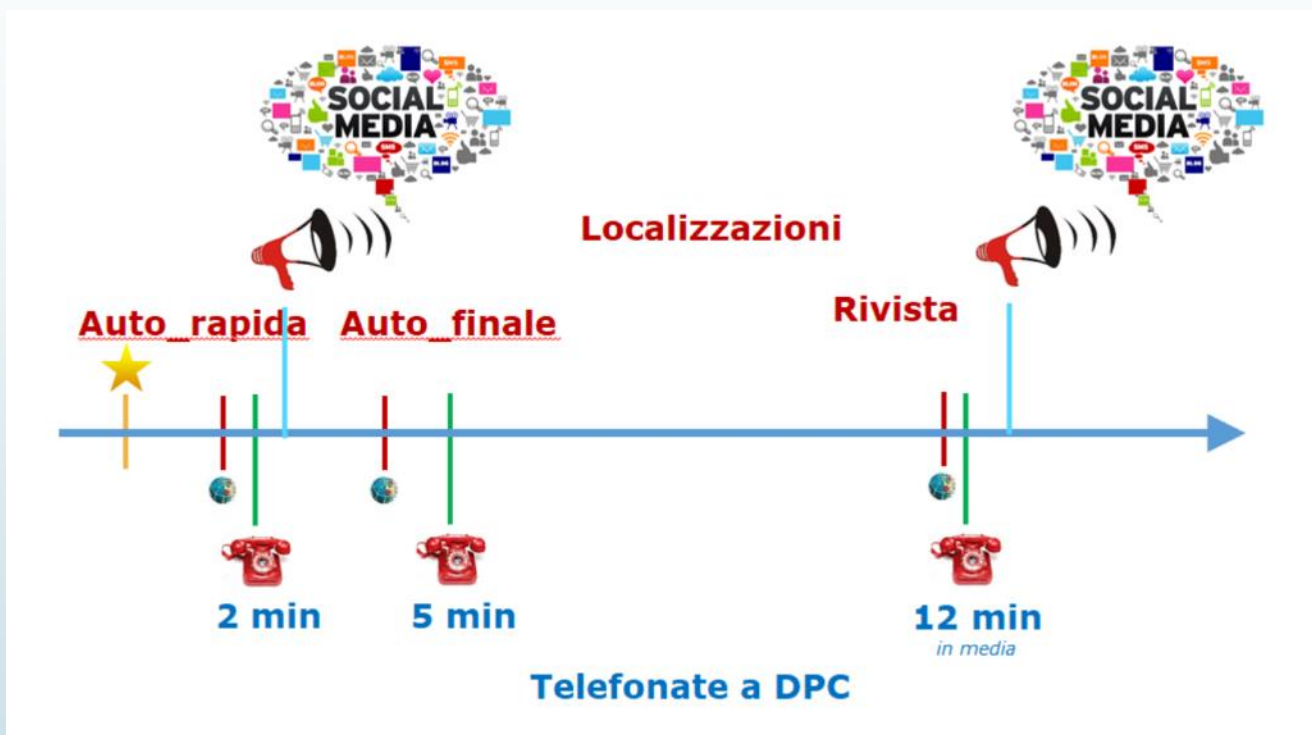
- Convenzioni tra l'INGV e Università e altri Enti di Ricerca che gestiscono reti locali sia in Italia sia all'estero. per l'acquisizione di dati sismici, infittendo così la Rete Sismica Nazionale
- Oggi la **Rete Sismica Nazionale Integrata**, conta ormai quasi **500 stazioni in tempo reale**.



Il servizio di sorveglianza sismica del territorio nazionale



Personale in turno H24 nella sala di sorveglianza sismica nella sede INGV di Via di Vigna Murata, Roma.



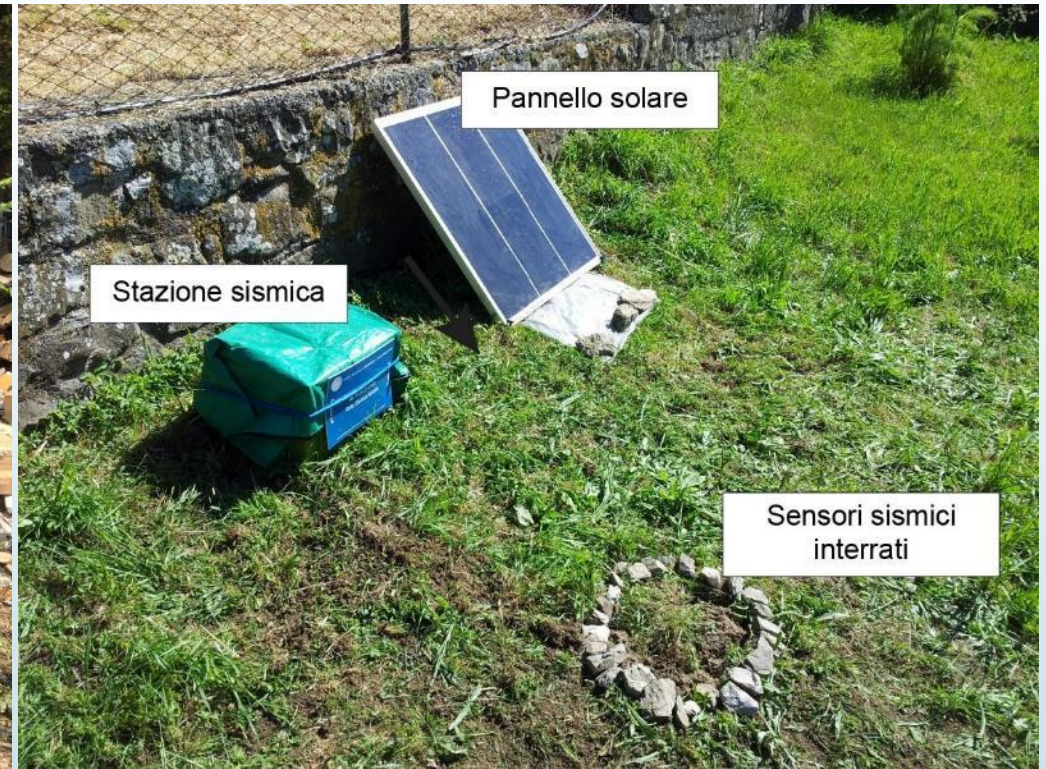
- L'INGV è il **Centro di Competenza del Sistema Nazionale di Protezione Civile** che si occupa della sorveglianza sismica del territorio nazionale.
- L'INGV fornisce, attraverso comunicati, i **dati ipocentrali** e la **magnitudo** in un primo tempo calcolati dal sistema automatico, successivamente elaborati dal sismologo in turno di sorveglianza.

sito web dell'INGV (<http://terremoti.ingv.it>)

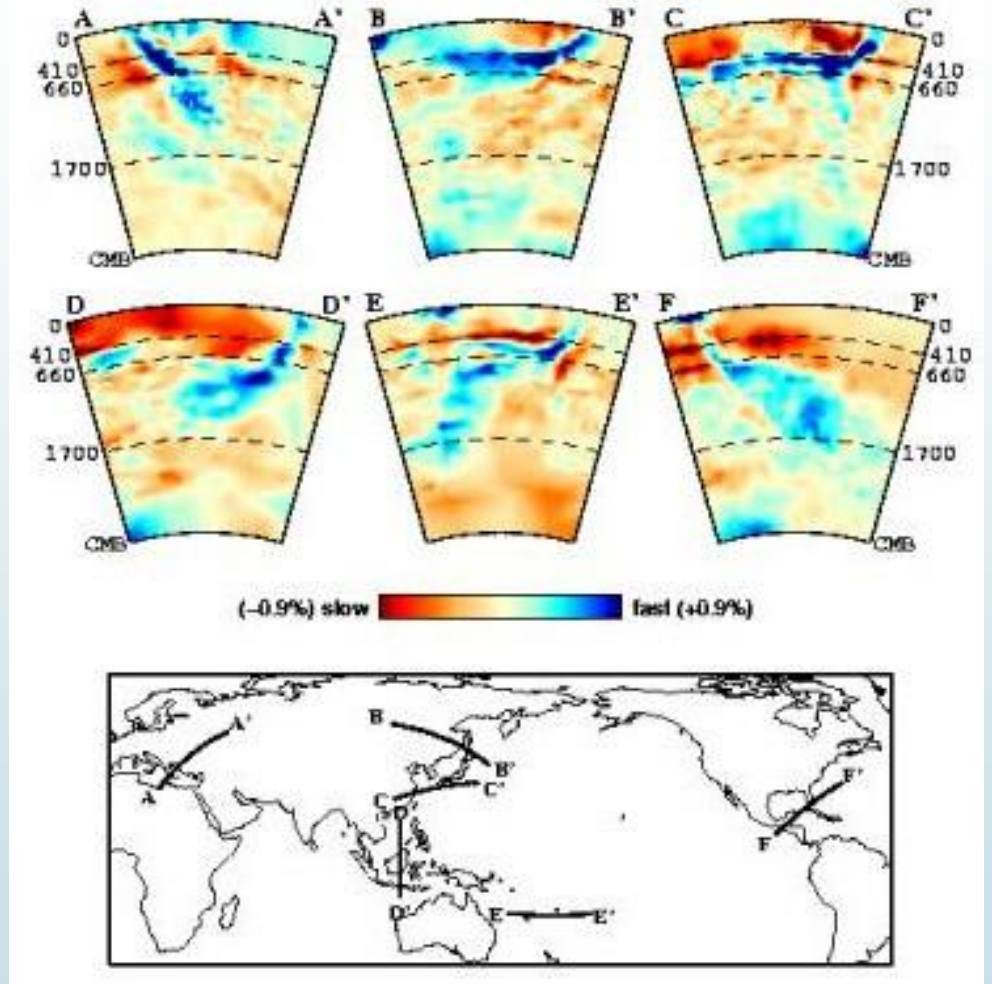
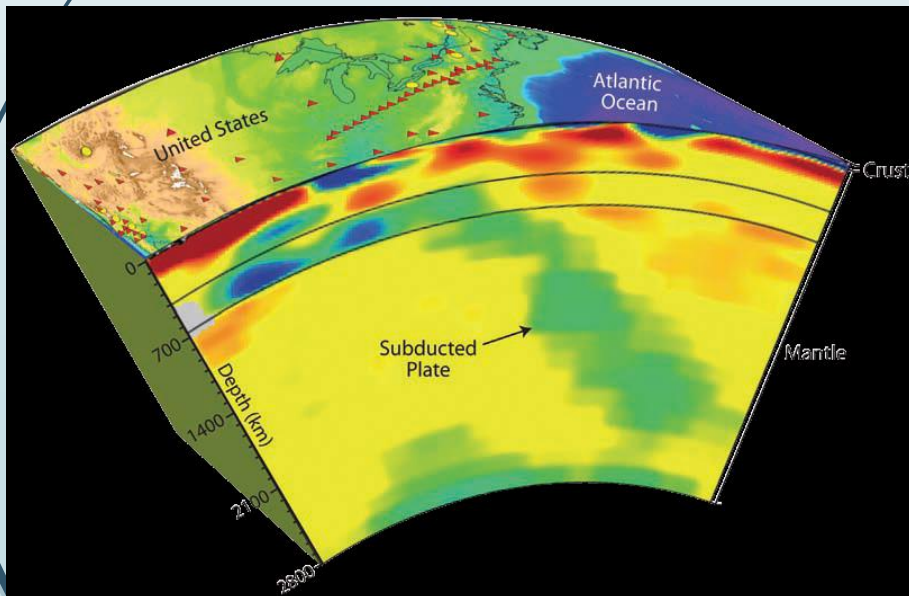
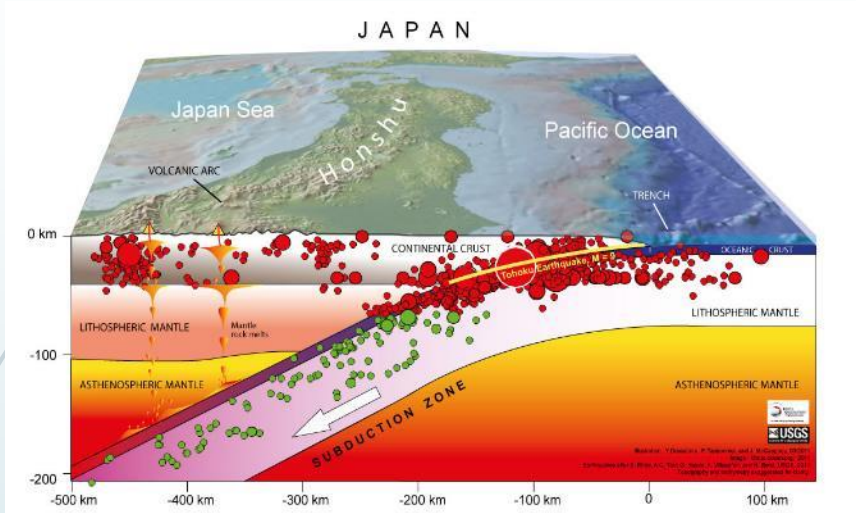
The screenshot shows the INGV website interface. At the top, there is a navigation bar with the INGV logo and the text "ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA". Below this is a menu with options like "Lista terremoti", "Reti sismiche", "Dati in tempo reale", "Osservatori e Centri", "INGVterremoti", "Guida al Sito", and "Contatti". A banner image of a seismogram is displayed. Below the banner, there are filters for "Fuso Orario: Italia", "Ultimi 7 giorni", "Magnitudo: 2+", and "Mondo", along with "Personalizza Ricerca" and "Mappa" buttons. A summary line states "Visualizzati terremoti da 1 a 30 dei 49 trovati (Ordinamento Tempo Decrescente)". Below this is a table of earthquake data.

Data e Ora (Italia)	Magnitudo	Zona	Profondità	Latitudine	Longitudine
2022-07-19 14:36:38	ML 3.0	1 km E Sant'Alessio in Aspromonte (RC)	8	38.17	15.77
2022-07-19 12:53:30	ML 2.0	Tirreno Meridionale (MARE)	85	38.80	15.60
2022-07-19 02:15:01	ML 2.4	Mar Ionio Meridionale (MARE)	7	37.26	16.22
2022-07-18 21:05:41	ML 2.5	Costa Croata Settentrionale (CROAZIA)	10	45.31	14.47
2022-07-18 20:40:35	Mwp 5.9	Norway [Sea]	1	78.46	4.96
2022-07-18 17:54:52	ML 2.2	Costa Marchigiana Picena (Ascoli Piceno)	30	43.07	14.16
2022-07-18 05:34:40	ML 2.3	Mar Ionio Settentrionale (MARE)	24	38.35	17.54
2022-07-16 23:41:23	ML 2.2	1 km E Bagnolo in Piano (RE)	21	44.76	10.69
2022-07-16 16:15:56	ML 2.2	Tirreno Meridionale (MARE)	32	38.52	13.99
2022-07-16 16:11:41	ML 2.2	Costa Calabria sud occidentale (Catanzaro, Vibo Valentia, Reggio di Calabria)	135	38.46	15.66

Le Reti Sismiche Mobili

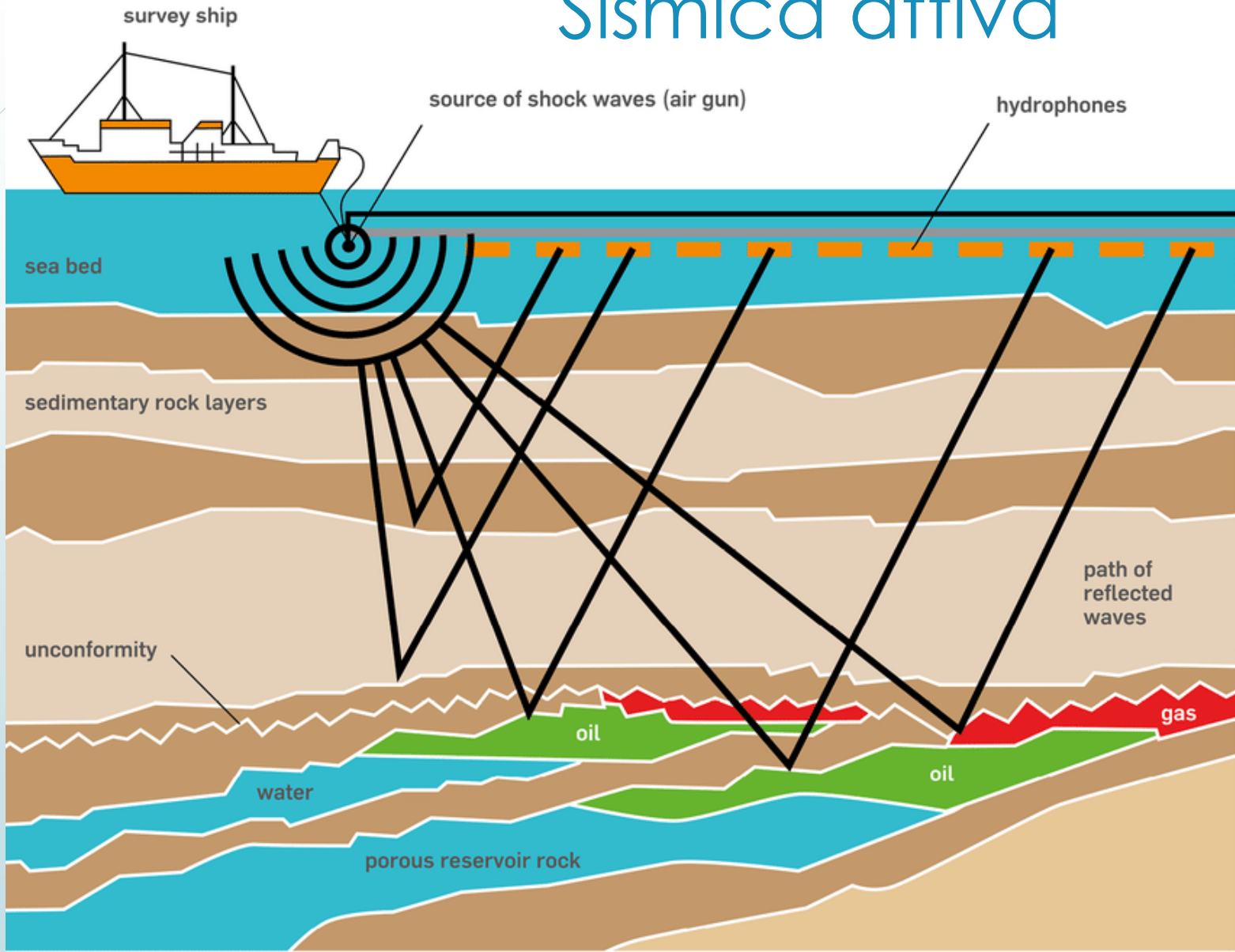


Tomografie sismiche lungo zone di subduzione tra placche



Van der Hilst, et al., 1998

Sismica attiva



Sorgenti sismiche a bassa energia



Sorgenti sismiche ad alta energia

Vibroiseis

Nessun impulso, segnale periodico

segnale significativo con stacking/deconvoluzione

Esplosivi

Differenti potenze

Costosi e pericolosi

Profondità : elevata

Air guns

In mare

Alta Ripetibilità

Per segnali significativi sono necessari grandi stendimenti

Problemi ambientali



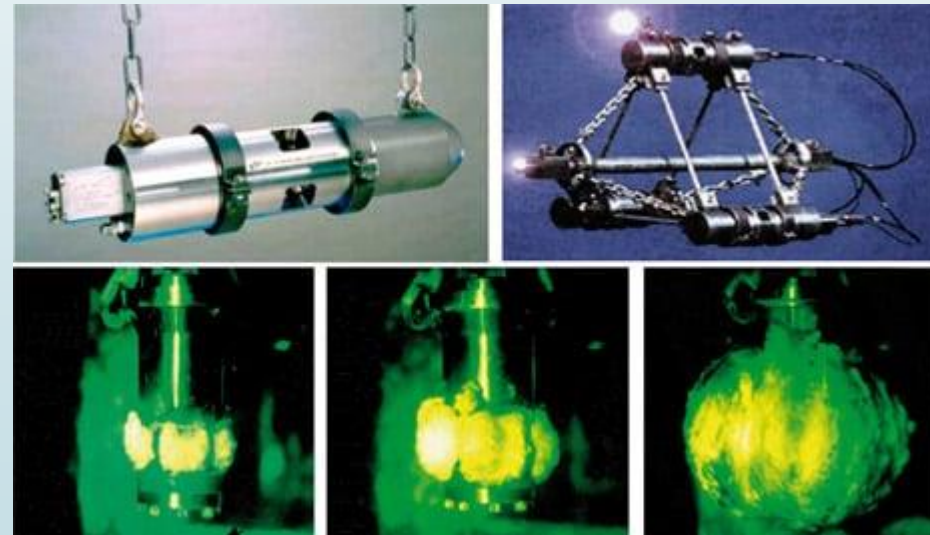
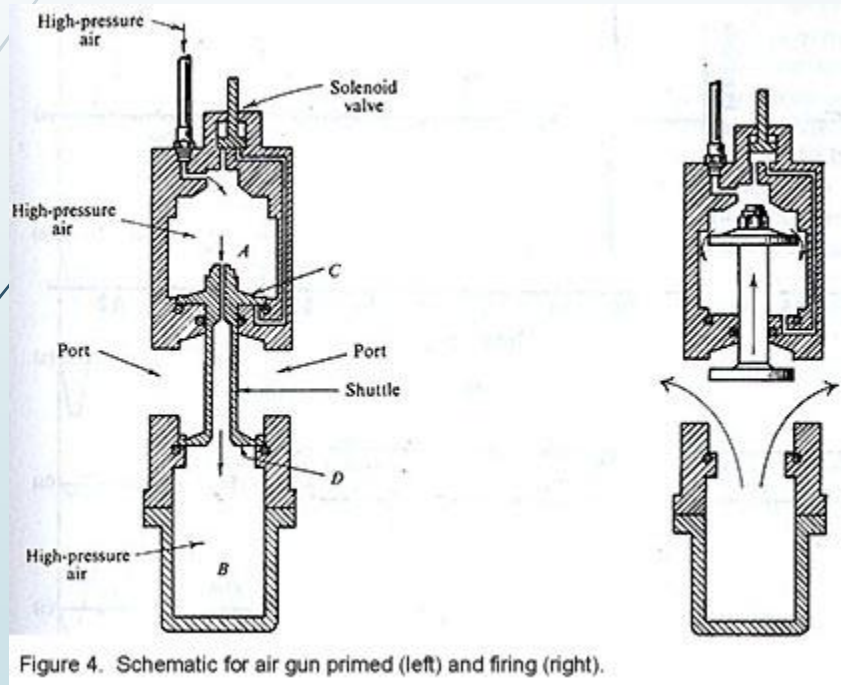
Proprietà da considerare per una buona sorgente sismica:

Energia sprigionata

- Forma d'onda
- Ripetibilità
- Costo
- Convenienza



Airgun (watergun)

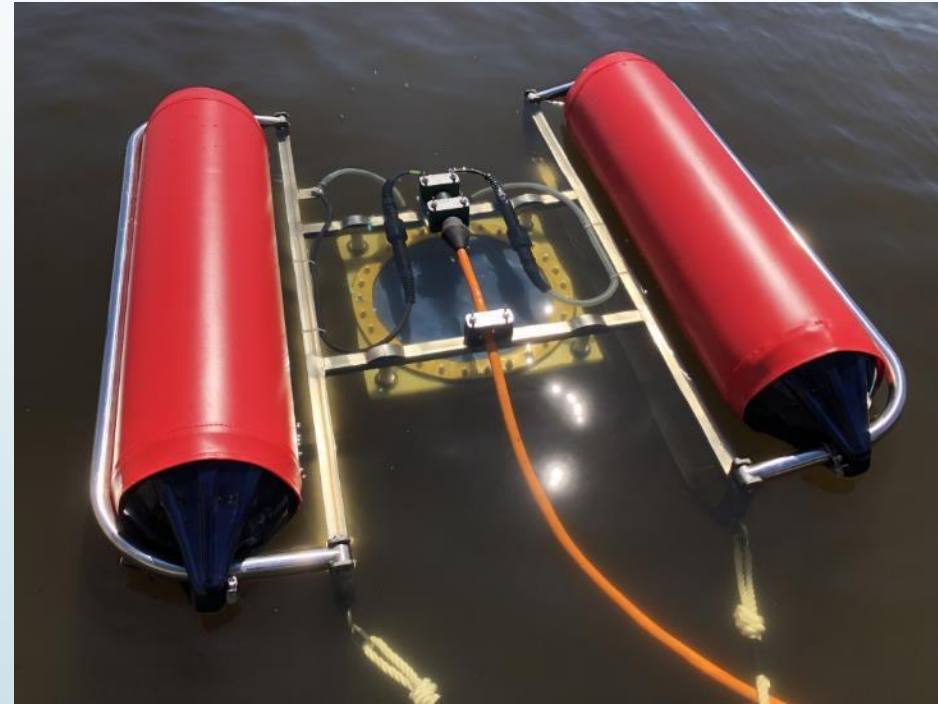


Top: Single air-gun and three-gun cluster ([www. bolt-technology.com](http://www.bolt-technology.com)). Bottom: Pictures of air bubbles 1 ms, 1.5 ms, and 7 ms after firing a small air-gun in a tank (Langhammer 1994)

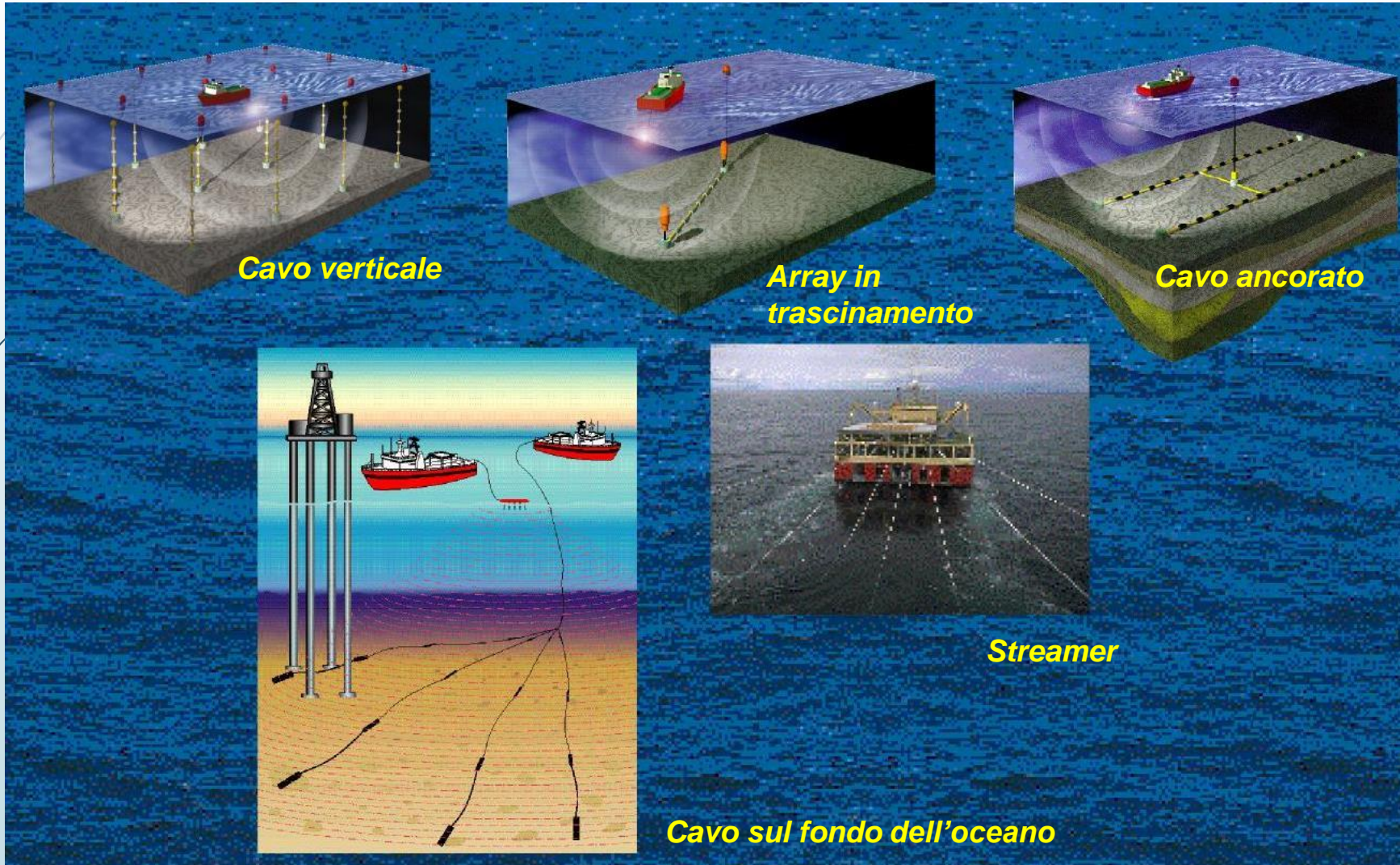
Airgun: ripresa dello scoppio



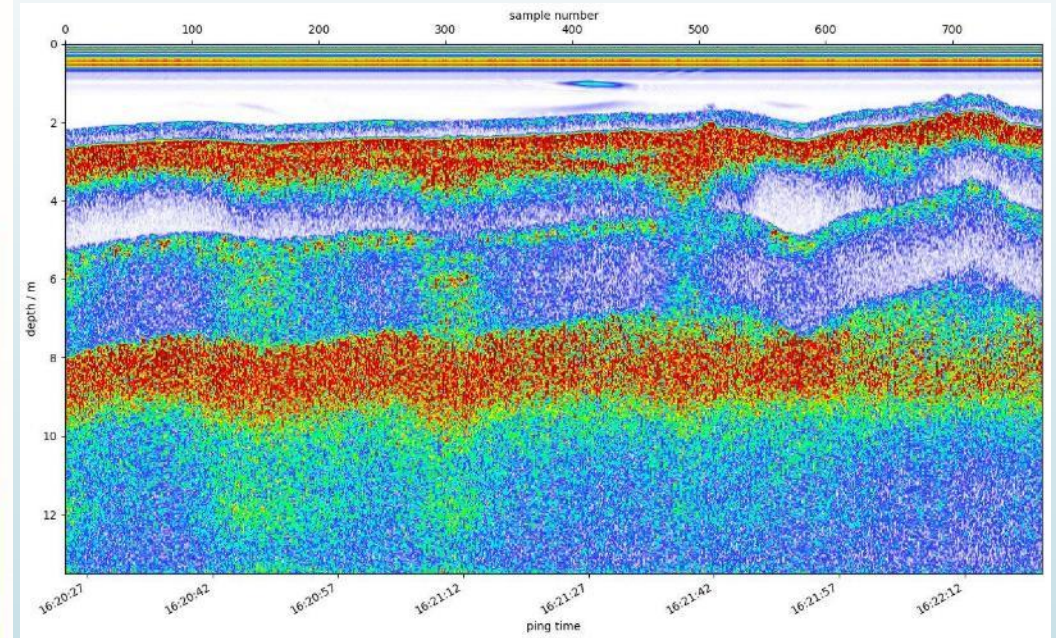
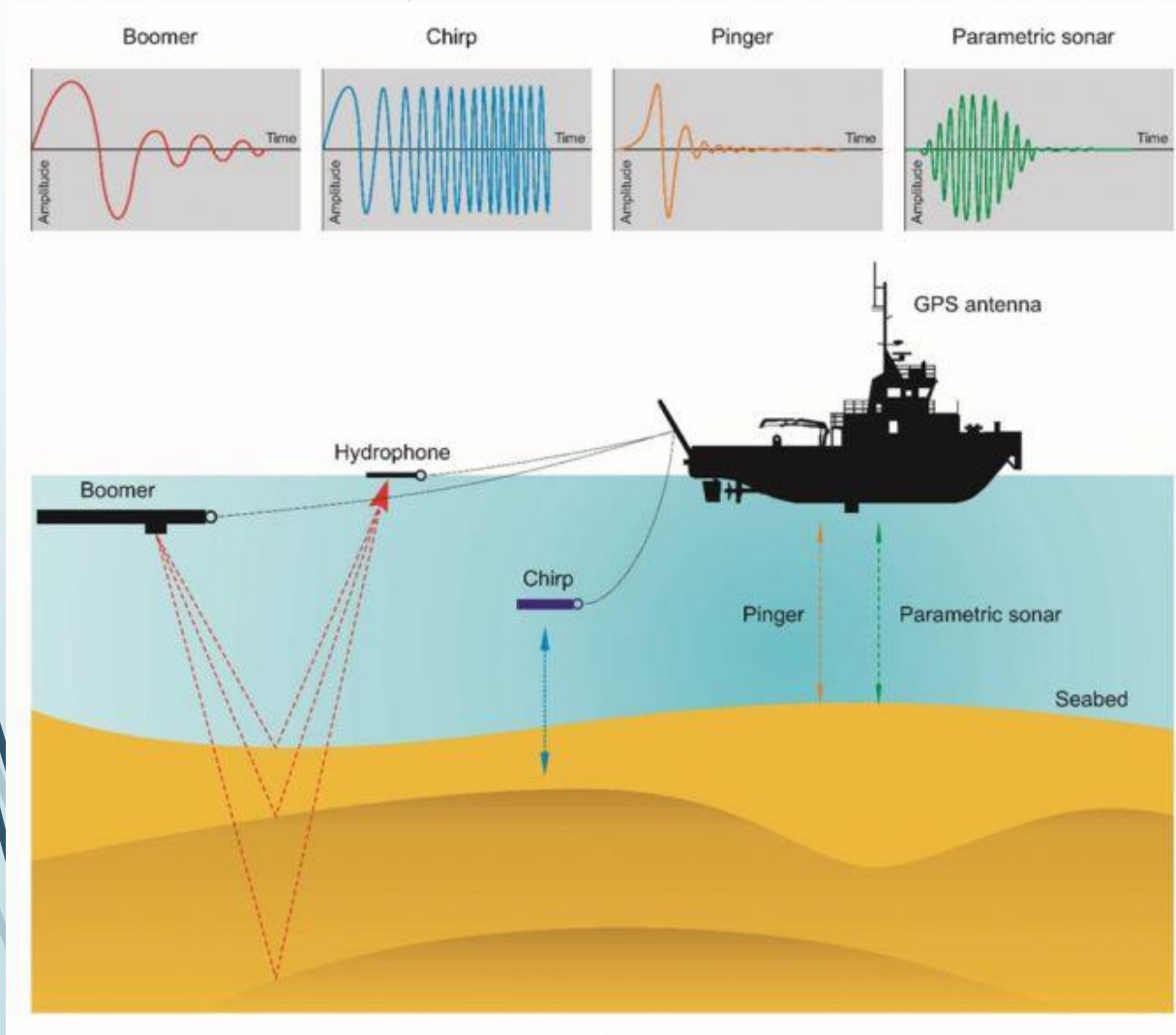
Sparker, boomer



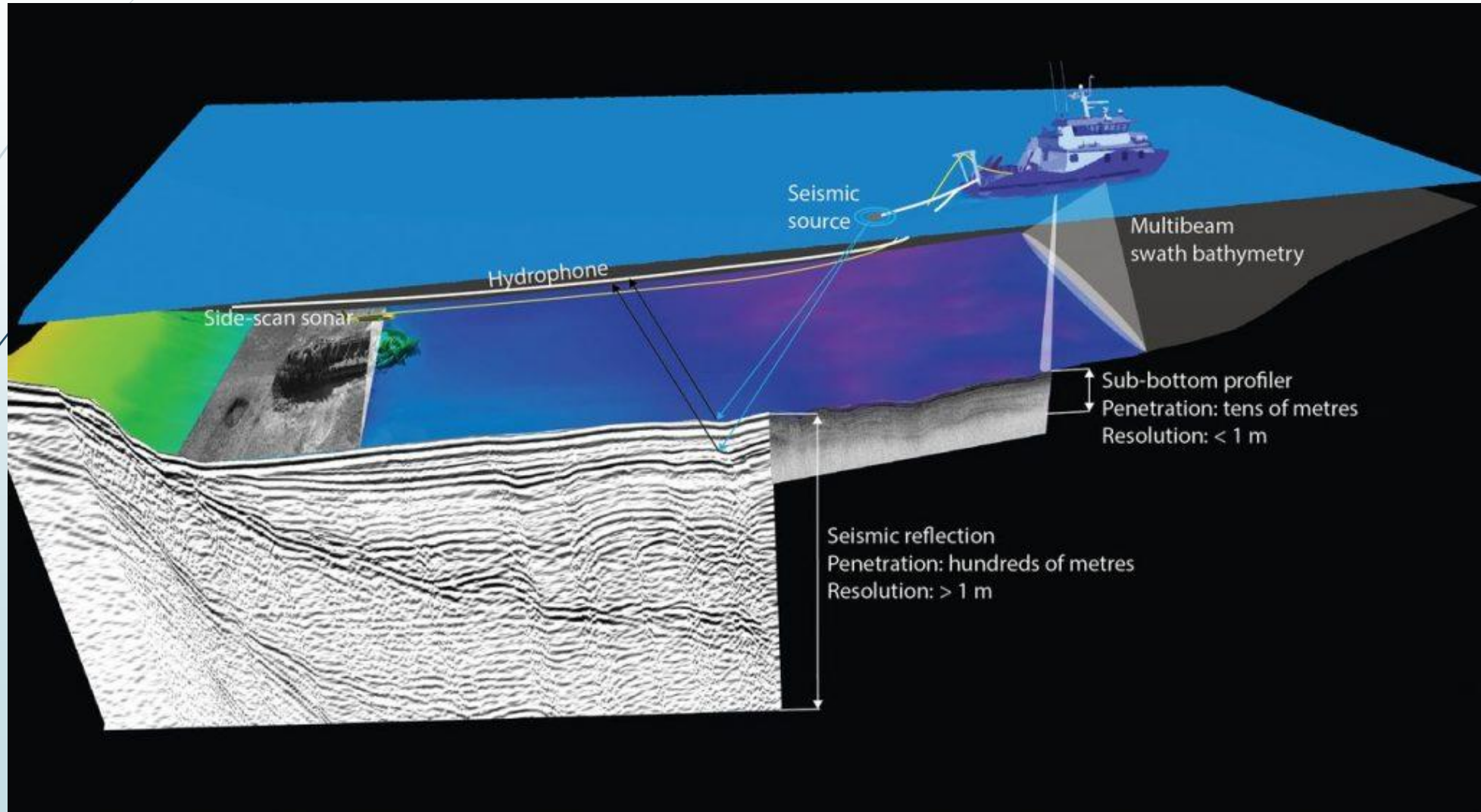
Sismica offshore: tecniche di acquisizione



Sub-bottom profiler system



Boomer, side scan sonar e sub-bottom profiler

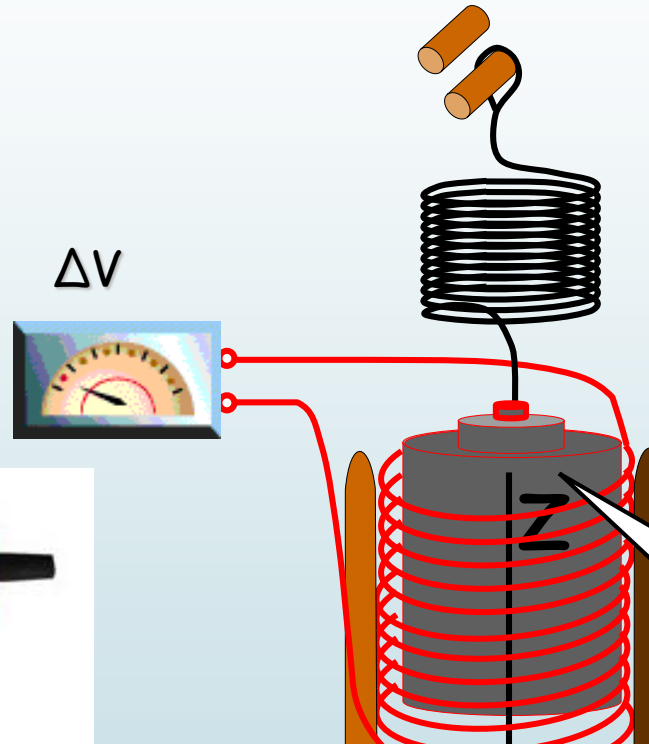


Geofono (sismometro ad alta frequenza) (trasduzione elettromagnetica)

La massa crea un campo magnetico con induzione B , il cui flusso è concatenato con le spire

$$\varphi(\mathbf{B}) \equiv z(t)$$

$$\Delta V = \frac{\partial \varphi(\mathbf{B})}{\partial t} \equiv \frac{\partial z(t)}{\partial t} = v_z(t)$$

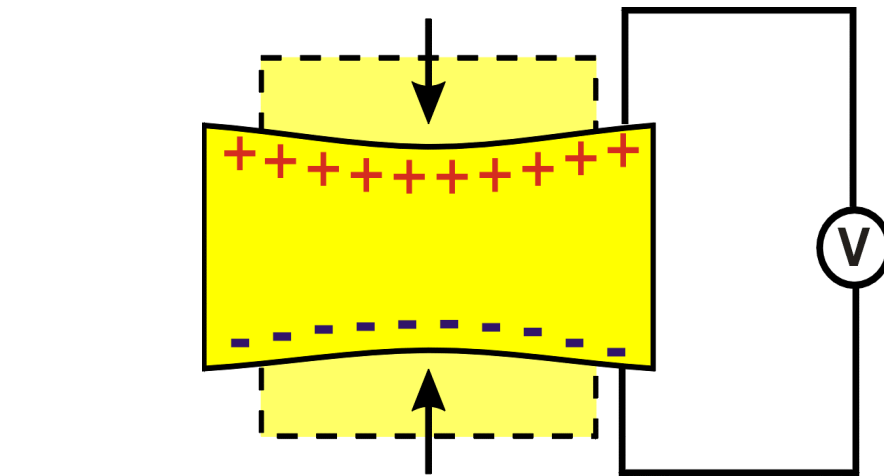


Massa ferro-magnetica che oscilla lungo l'asse z

La bobina o il magnete devono essere fissati al terreno



Idrofono



Principio di funzionamento:
effetto piezoelettrico

La differenza di potenziale è proporzionale alla variazione di pressione



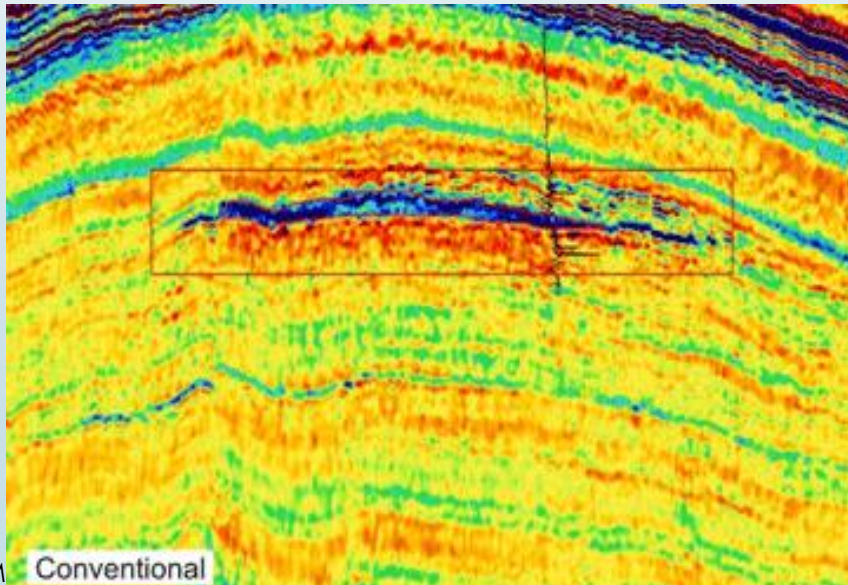
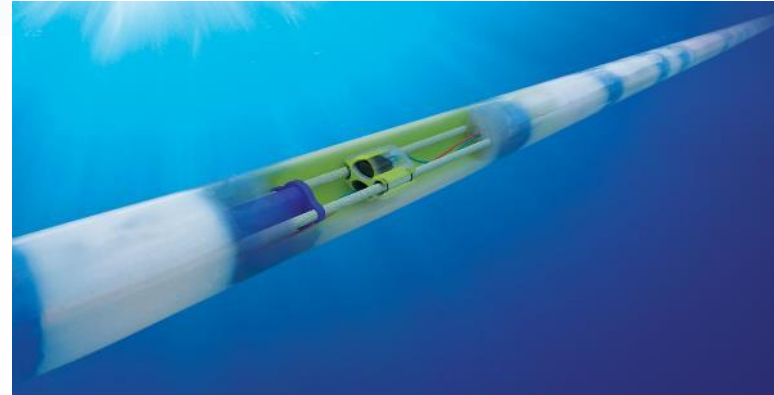
Idrofoni e streamer



idrofono



idrofono



Conventional



streamer

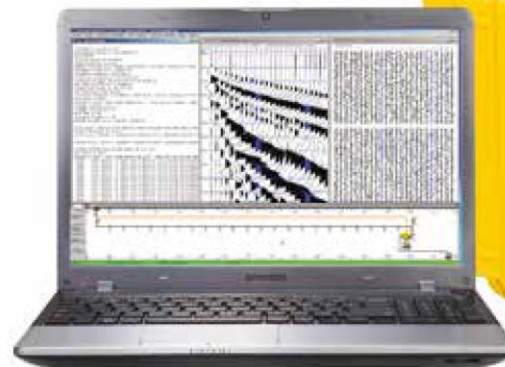
Sezione di impedenza acustica



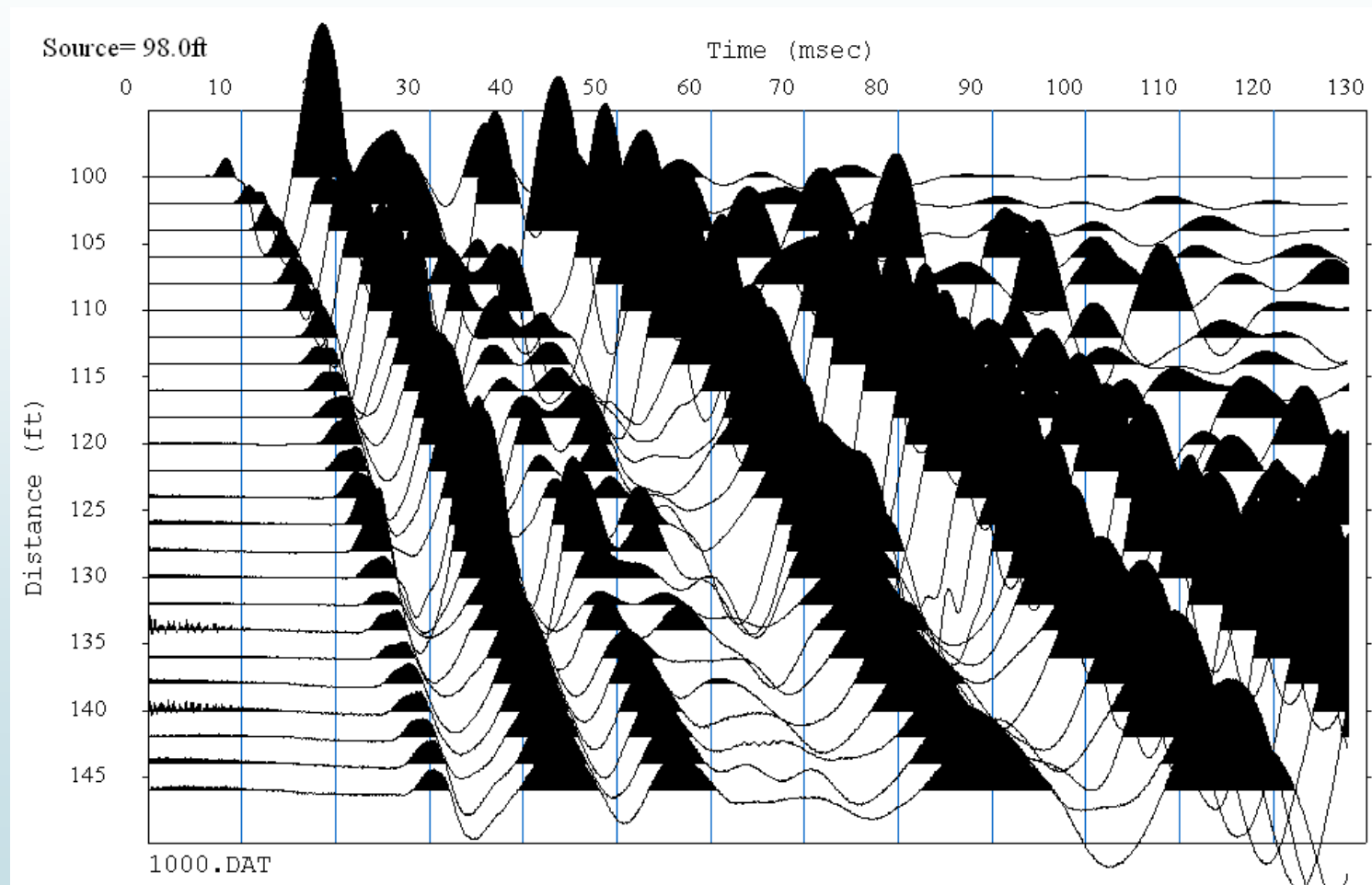
Abem Terraloc mk-6

Sismografo digitale a 48 canali



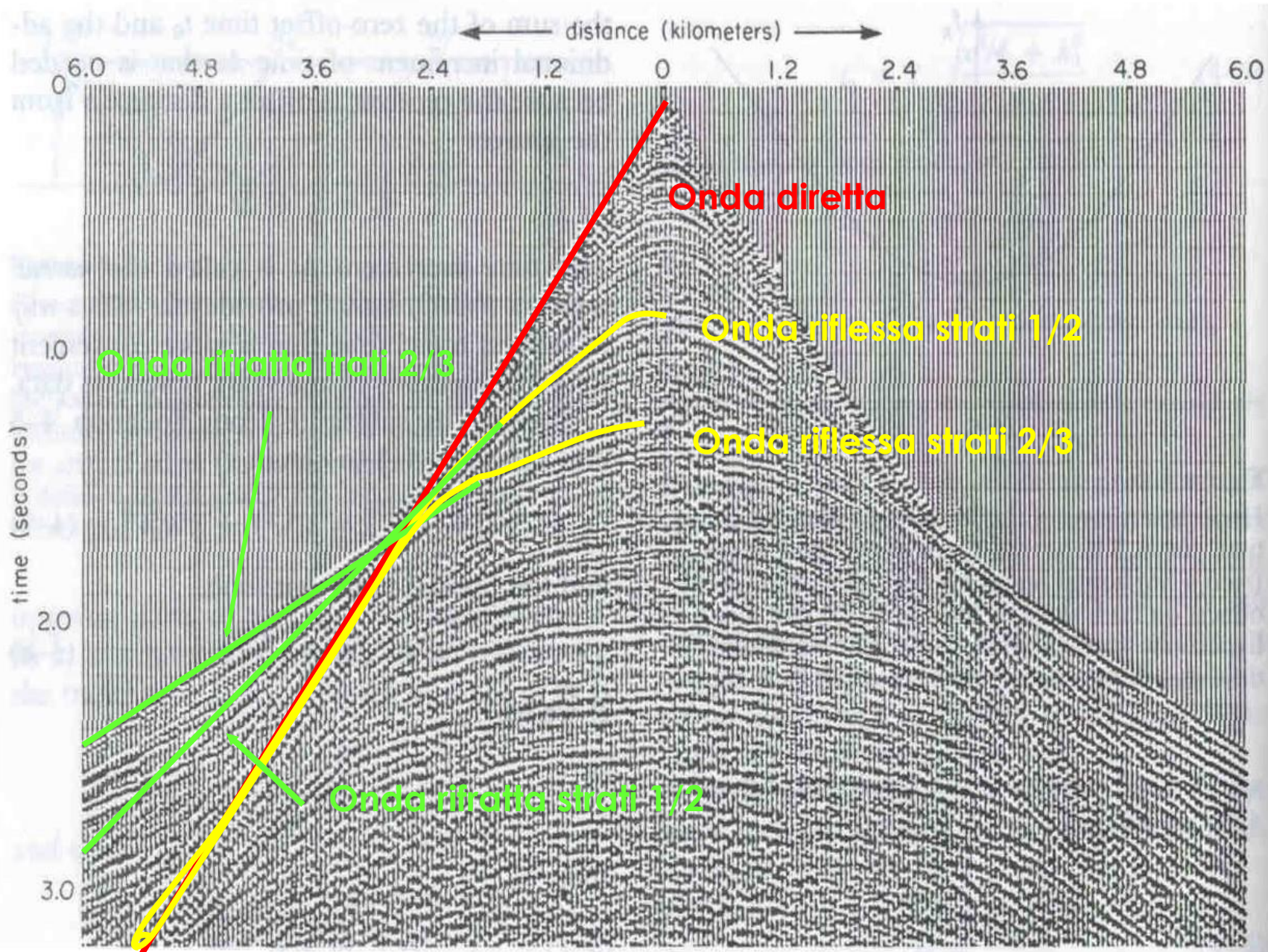


Registrazione per sismica a rifrazione con 24 geofoni

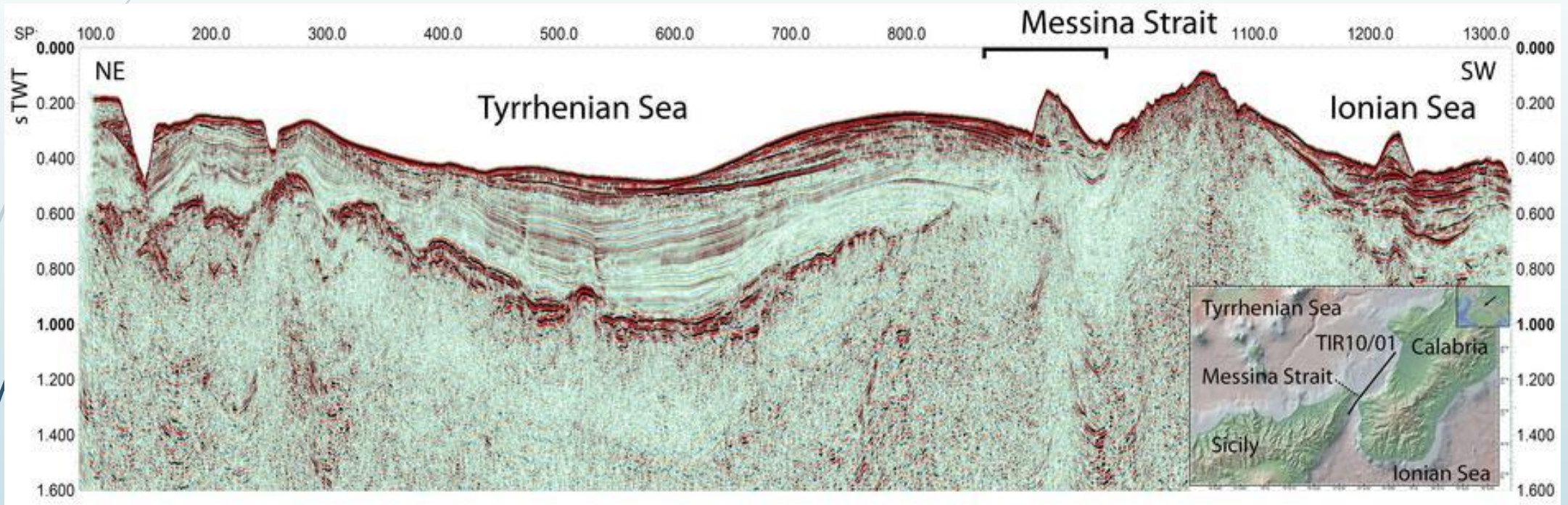


Shot record di sismica a riflessione

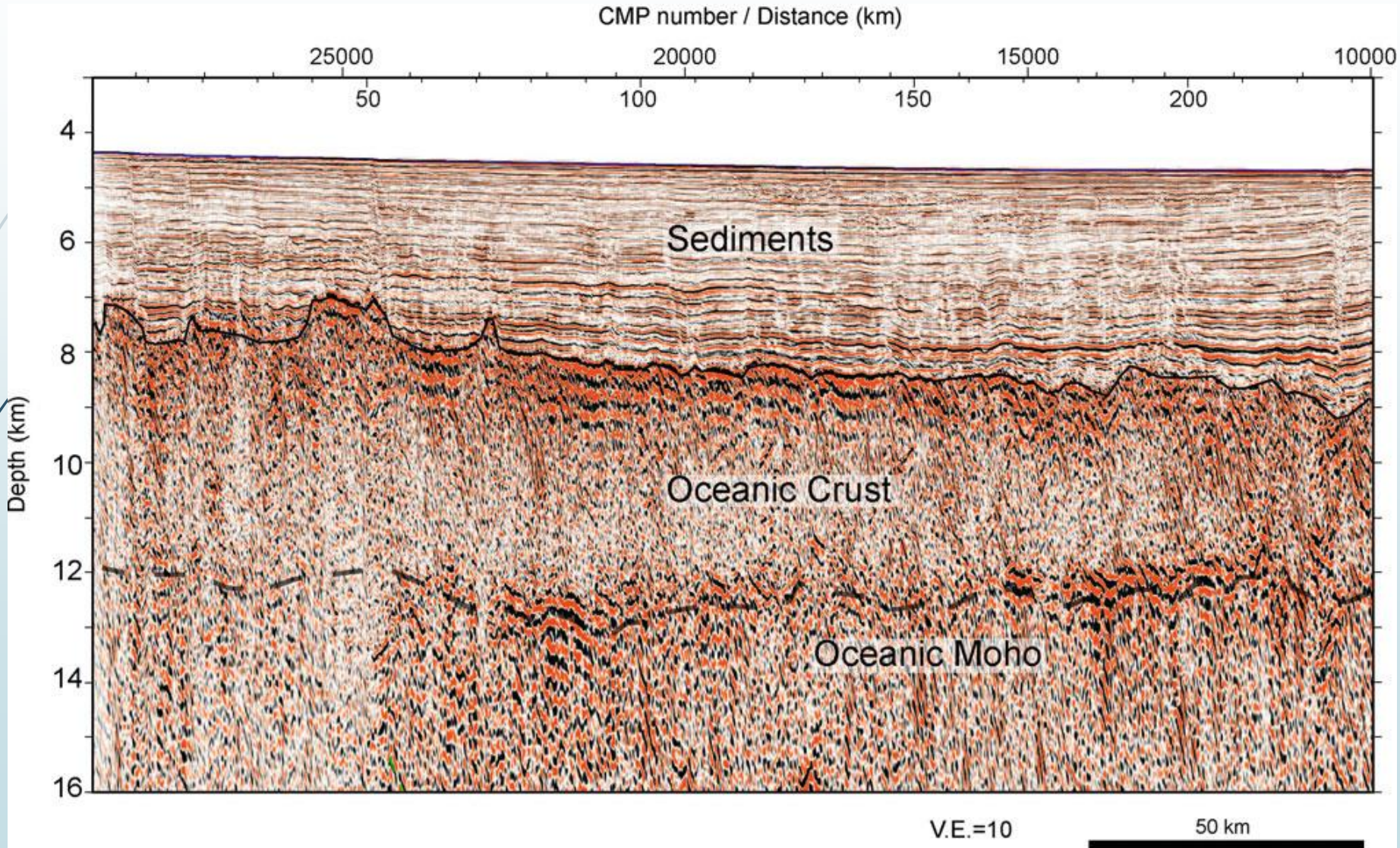
45



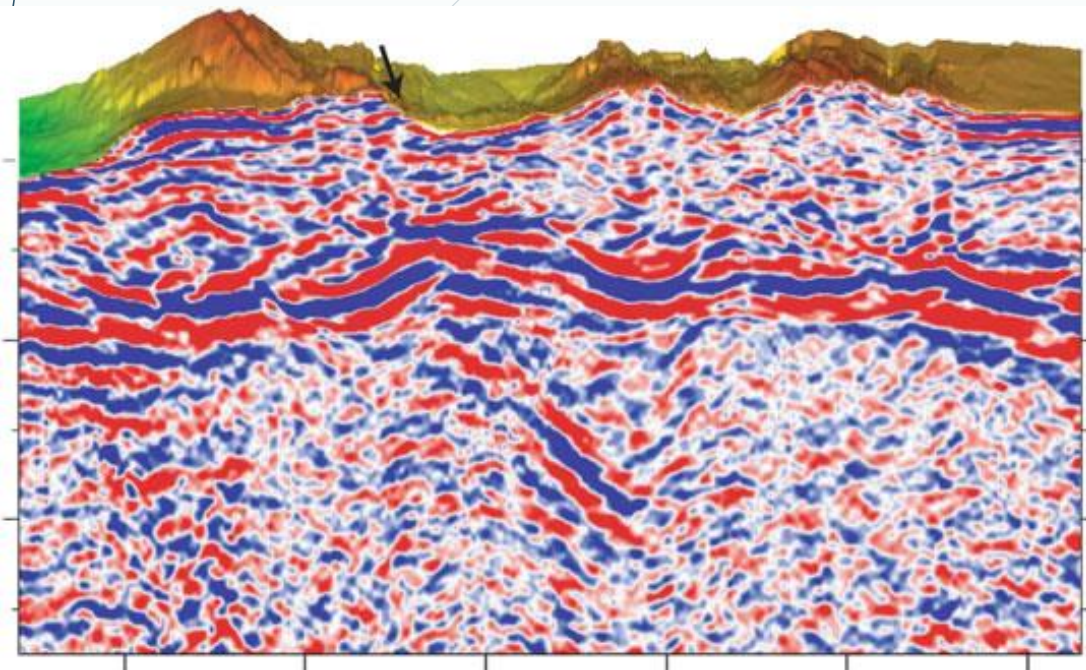
Sismica a riflessione:



Sezione sismica a riflessione: Oceano Indiano

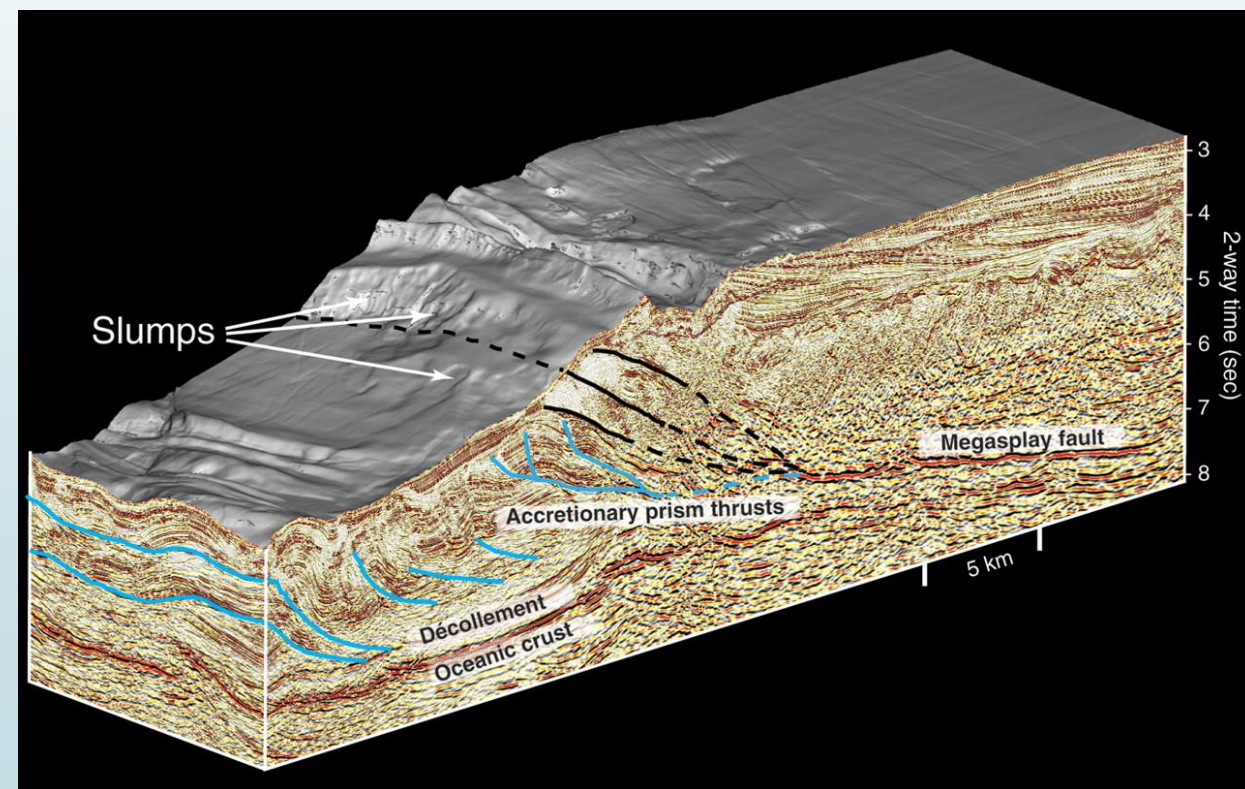


Sismica a riflessione 2D



Nella sismica a riflessione si parte dall'acquisizione dei sismogrammi da parte di numerosissimi sensori allineati a varia distanza dalla sorgente. Le registrazioni sismiche subiscono una complessa fase di processing ed elaborazione che consentono di ricostruire un modello 2d o 3D in cui vengono ben evidenziate le discontinuità stratigrafiche.

e 3D



GRUPPI DI METODI GEOFISICI	PARAMETRI FISICI STUDIATI	GRANDEZZE MISURATE	Energia	Attivo	Passivo	Studio della sorgente	Trasmissione	Riflessione	Rifrazione
Gravimetria	Densità	Accelerazione di gravità	Campi di potenziale	N	S	S			
Magnetometria	permeab. magnetica magnetiz. indotta magnetiz. rimanente	Intensità del campo magnetico		N	S	S			
Geoelettrica	Resistività elettrica caricabilità elettrica	Correnti elettriche Potenziali elettrici		S	S	S			
Geotermia	capacità termica conducibilità termica	Temperatura		S	S	S	S		
Sismica	velocità sismica impedenza sismica tempi di percorso smorzamento	Vibrazioni elastiche	Campi d'onde	S	S	S	S	S	S
Elettromagnetismo	conducibilità elettrica costante dielettrica smorzamento	Campi elettromagnetici		S	S	S	S	S	S
Radioattività	concentrazione degli isotopi radioattivi	Numero di radiazioni	Particelle	S	S	S	S		

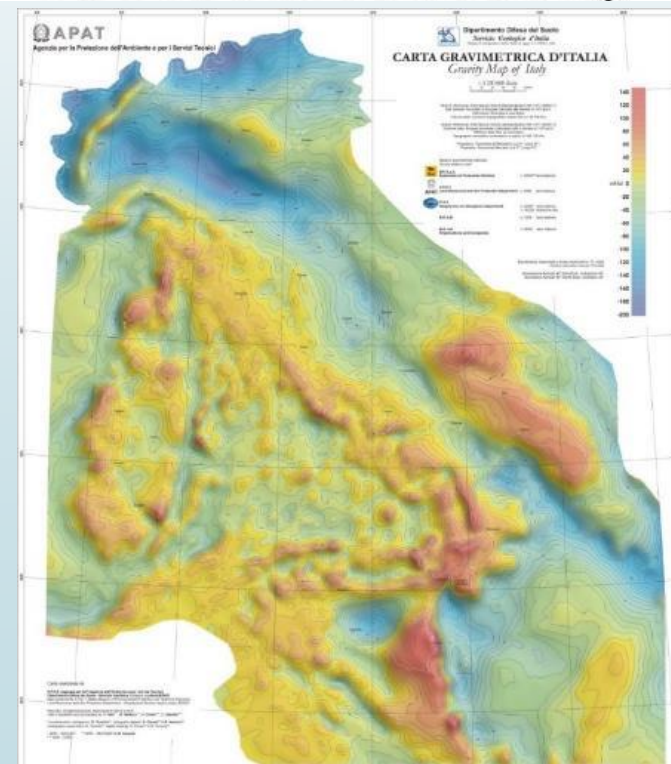
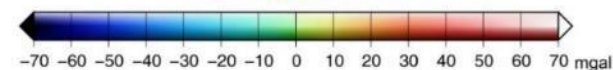
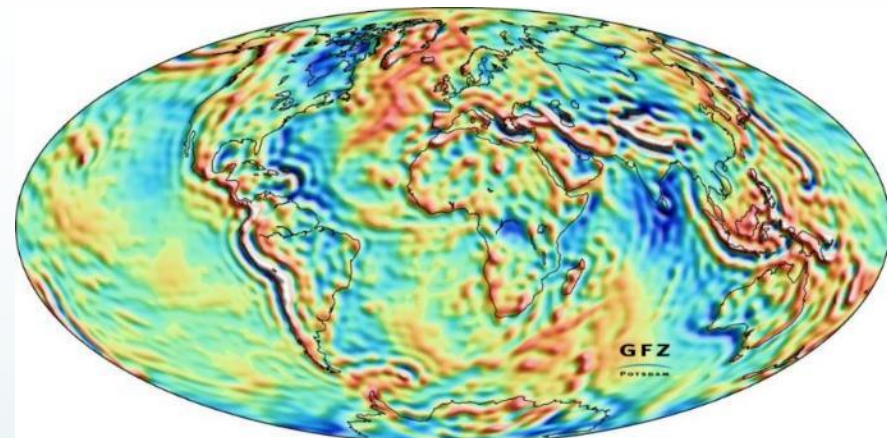
LaCoste-Romberg



Scintrex CG-5



CG-5 Autograv



GRUPPI DI METODI GEOFISICI	PARAMETRI FISICI STUDIATI	GRANDEZZE MISURATE	Energia	Attivo	Passivo	Studio della sorgente	Trasmissione	Riflessione	Rifrazione
Gravimetria	Densità	Accelerazione di gravità	Campi di potenziale	N	S	S			
Magnetometria	permeab. magnetica magnetiz. indotta magnetiz. rimanente	Intensità del campo magnetico		N	S	S			
Geoelettrica	Resistività elettrica caricabilità elettrica	Correnti elettriche Potenziali elettrici		S	S	S			
Geotermia	capacità termica conducibilità termica	Temperatura		S	S	S	S		
Sismica	velocità sismica impedenza sismica tempi di percorso smorzamento	Vibrazioni elastiche	Campi d'onde	S	S	S	S	S	S
Elettromagnetismo	conducibilità elettrica costante dielettrica smorzamento	Campi elettromagnetici		S	S	S	S	S	S
Radioattività	concentrazione degli isotopi radioattivi	Numero di radiazioni	Particelle	S	S	S	S		

Magnetometri e gradiometri

Tipi di magnetometri:

- a protoni
- a pompaggio ottico
- fluxgate

Precisione richiesta: circa ± 0.1 nT

Magnetometro con GPS



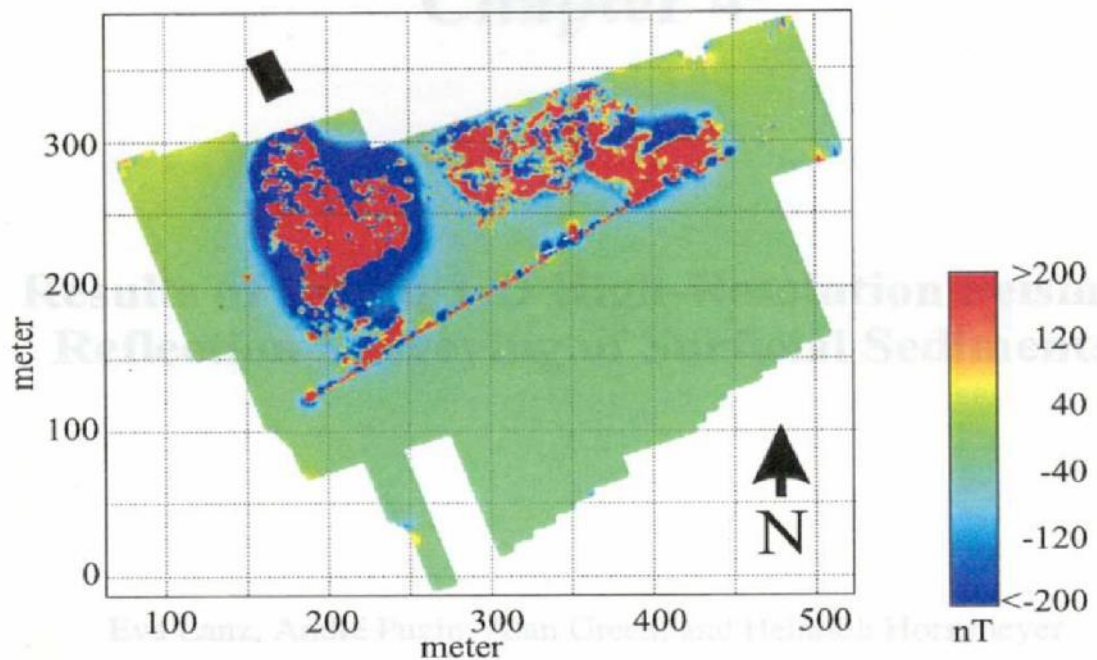
Gradiometro

Sono costituiti da una coppia di magnetometri allineati verticalmente al fine di misurare il gradiente verticale del campo magnetico.

Sono utilizzati per indagini geofisiche superficiali perché la misura del gradiente permette di eliminare automaticamente le variazioni regionali e temporali

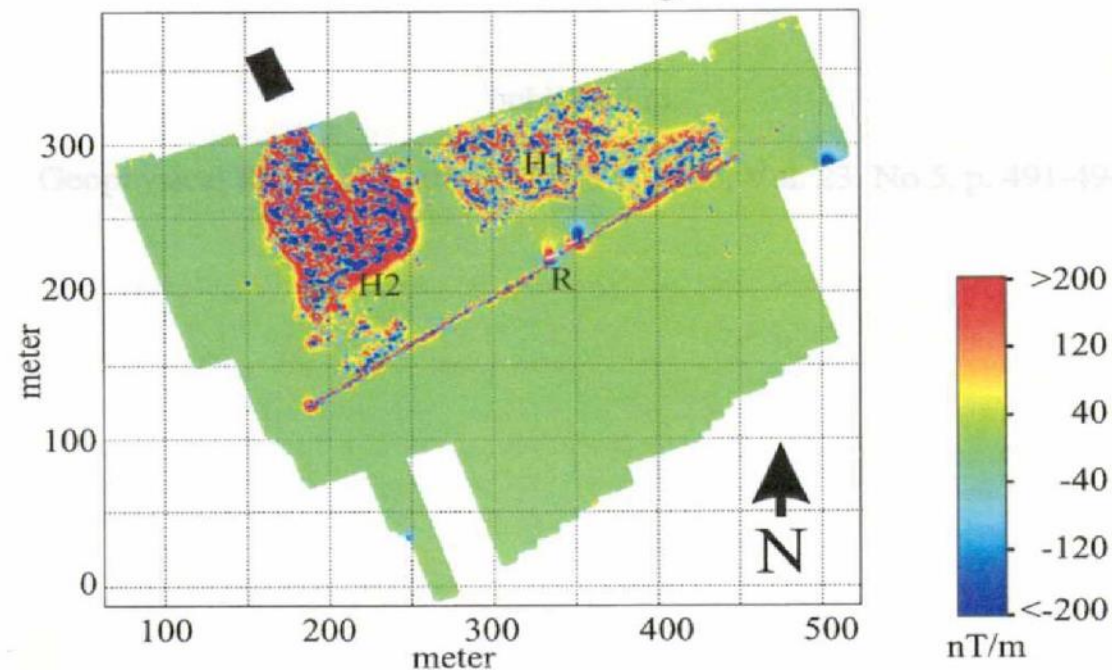
Magnetometria in discarica

Bottom Sensor Total-Field Magnetic



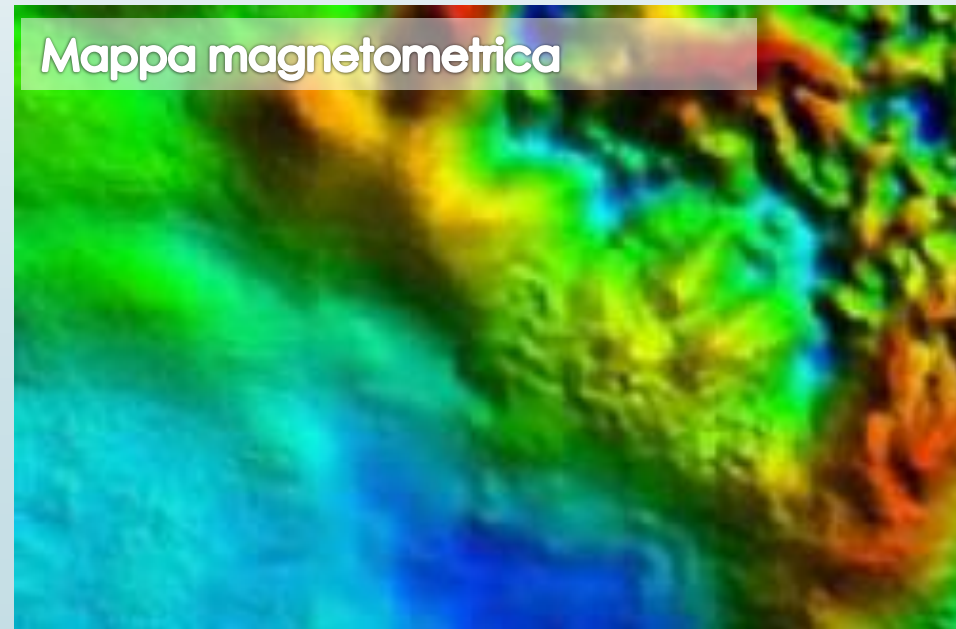
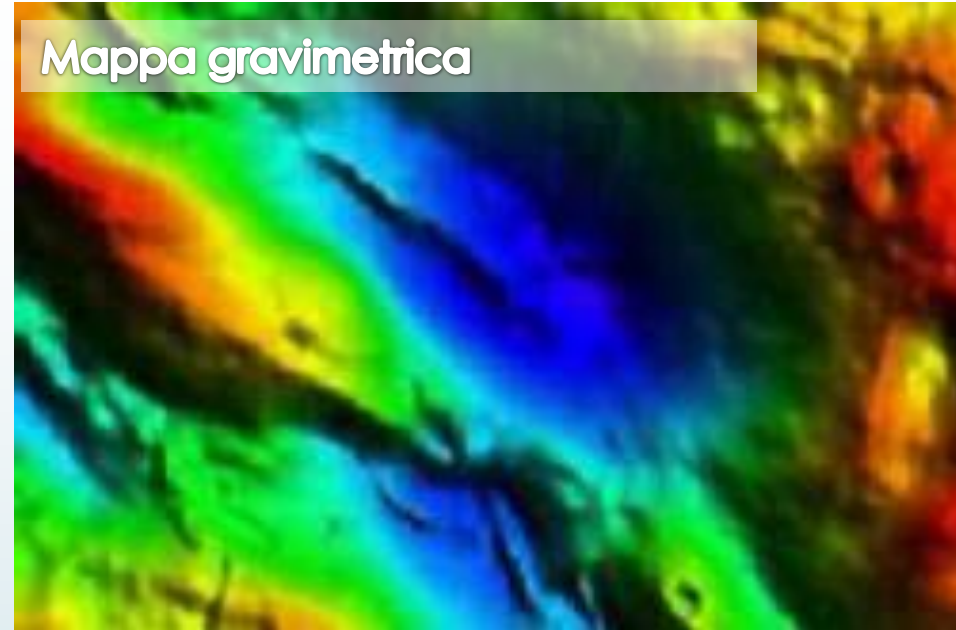
Magnetometro

Vertical-Gradient Magnetic



Gradiometro

Confronto fra gravimetria e magnetometria



GRUPPI DI METODI GEOFISICI	PARAMETRI FISICI STUDIATI	GRANDEZZE MISURATE	Energia	Attivo	Passivo	Studio della sorgente	Trasmissione	Riflessione	Rifrazione
Gravimetria	Densità	Accelerazione di gravità	Campi di potenziale	N	S	S			
Magnetometria	permeab. magnetica magnetiz. indotta magnetiz. rimanente	Intensità del campo magnetico		N	S	S			
Geoelettrica	Resistività elettrica caricabilità elettrica	Correnti elettriche Potenziali elettrici		S	S	S			
Geotermia	capacità termica conducibilità termica	Temperatura		S	S	S	S		
Sismica	velocità sismica impedenza sismica tempi di percorso smorzamento	Vibrazioni elastiche	Campi d'onde	S	S	S	S	S	S
Elettromagnetismo	conducibilità elettrica costante dielettrica smorzamento	Campi elettromagnetici		S	S	S	S	S	S
Radioattività	concentrazione degli isotopi radioattivi	Numero di radiazioni	Particelle	S	S	S	S		

Resistivimetro multicanale VHR 96 canali integrati **MAE X612-EM+**



Rullo con cavo elettrico multicanale



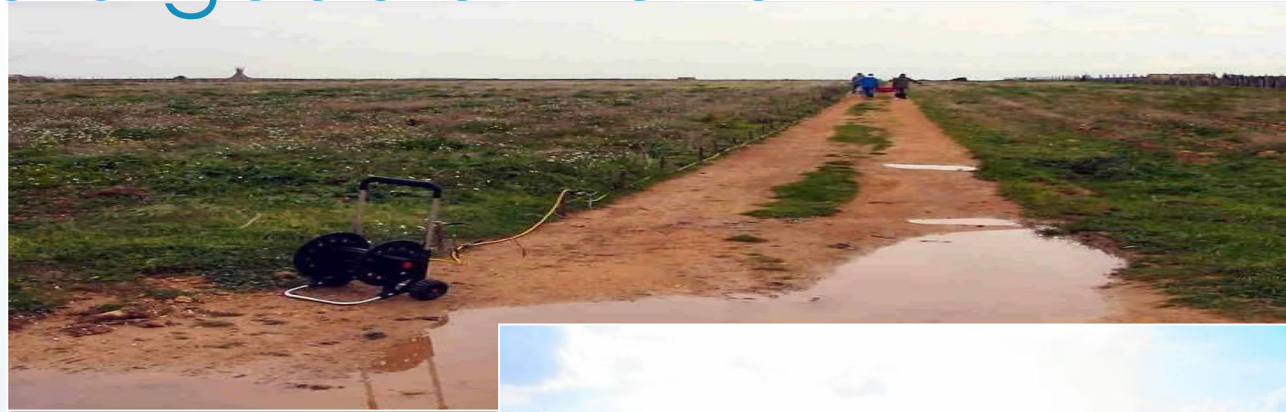
Connettore



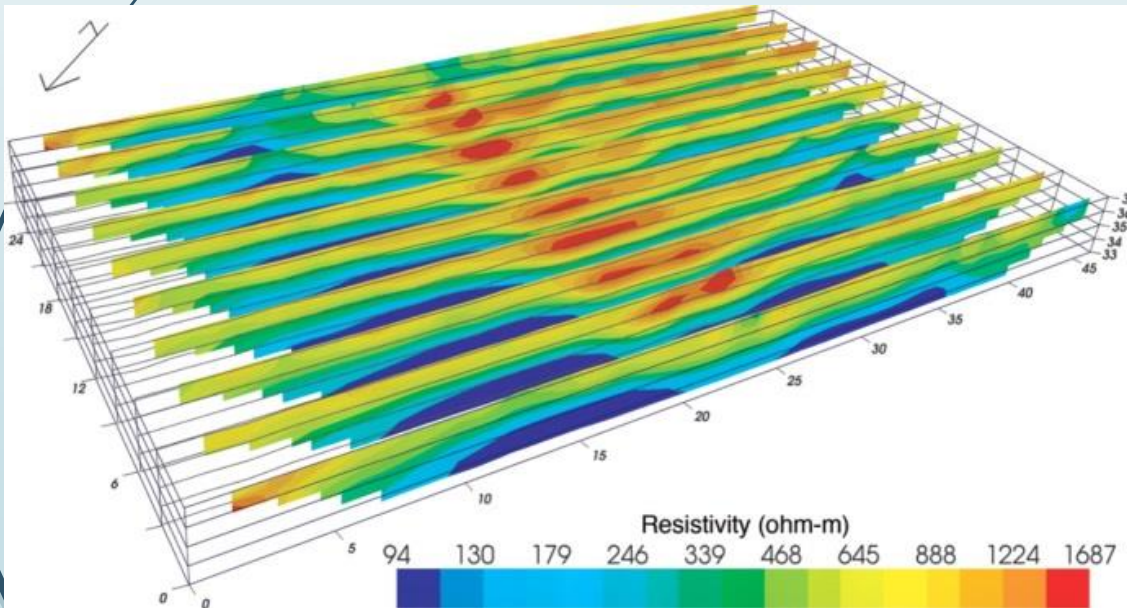
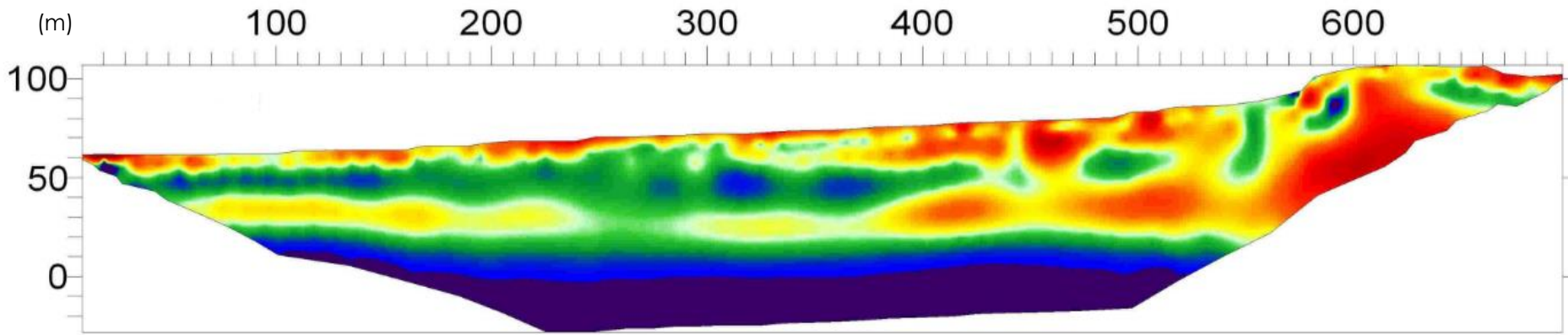
Elettrodo metallico

Fasi delle misure geoelettriche

57



Tomografie di resistività elettrica



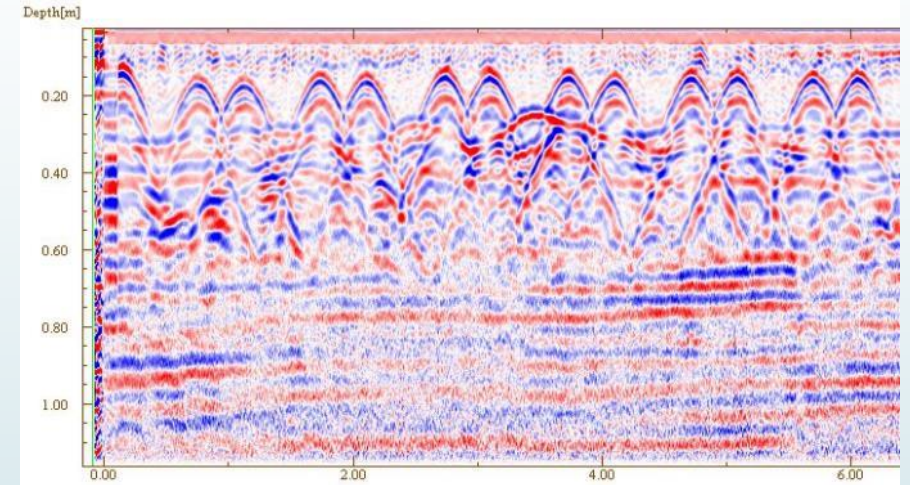
GRUPPI DI METODI GEOFISICI	PARAMETRI FISICI STUDIATI	GRANDEZZE MISURATE	Energia	Attivo	Passivo	Studio della sorgente	Trasmissione	Riflessione	Rifrazione
Gravimetria	Densità	Accelerazione di gravità	Campi di potenziale	N	S	S			
Magnetometria	permeab. magnetica magnetiz. indotta magnetiz. rimanente	Intensità del campo magnetico		N	S	S			
Geoelettrica	Resistività elettrica caricabilità elettrica	Correnti elettriche Potenziali elettrici		S	S	S			
Geotermia	capacità termica conducibilità termica	Temperatura		S	S	S	S		
Sismica	velocità sismica impedenza sismica tempi di percorso smorzamento	Vibrazioni elastiche	Campi d'onde	S	S	S	S	S	S
Elettromagnetismo	conducibilità elettrica costante dielettrica smorzamento	Campi elettromagnetici		S	S	S	S	S	S
Radioattività	concentrazione degli isotopi radioattivi	Numero di radiazioni	Particelle	S	S	S	S		

Il Ground Penetrating Radar (GPR o georadar)

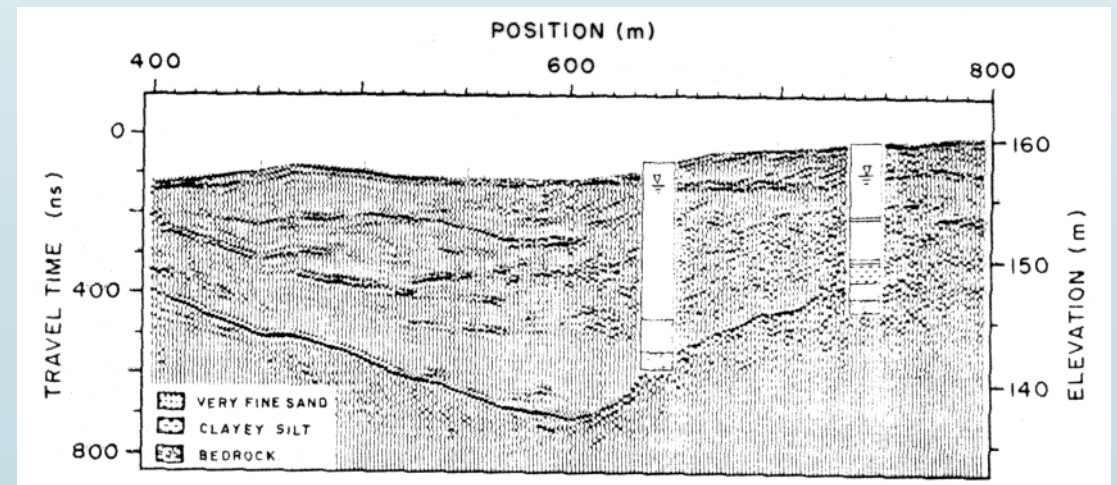
Su strada



Sezioni GPR



Su drone



GPR per ricerca archeologica

Sistema radar ottimizzato per l'archeologia



GPS

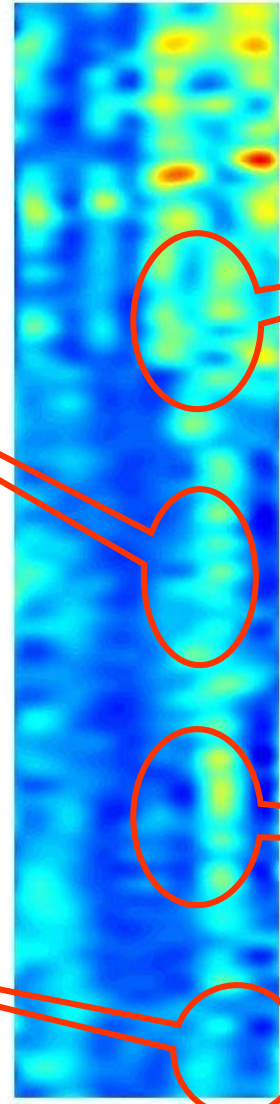


Indagini georadar nel sito archeologico di Himera

62



79 m

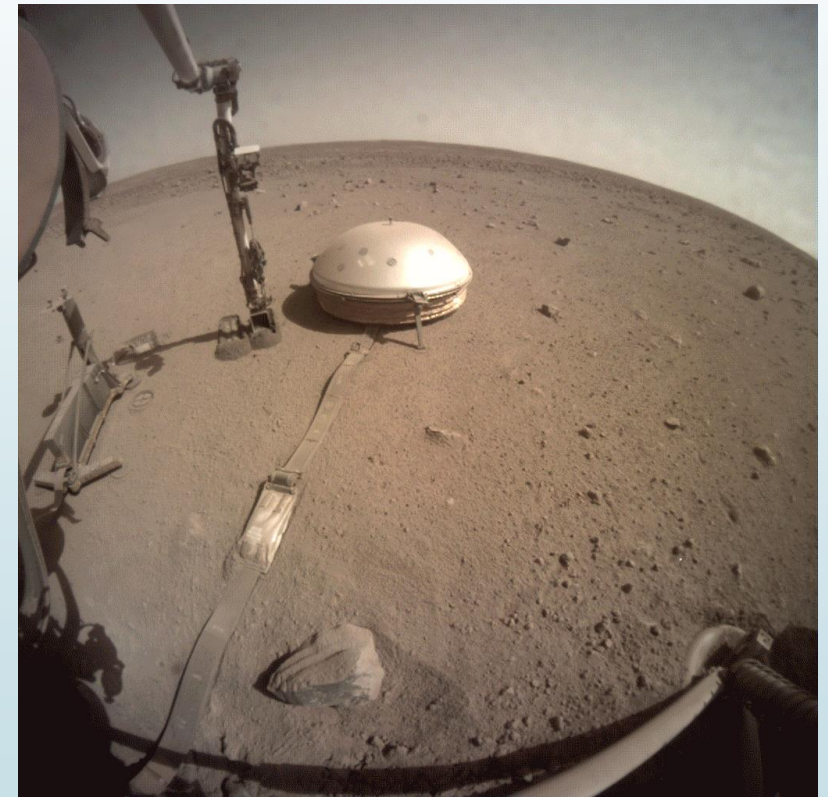
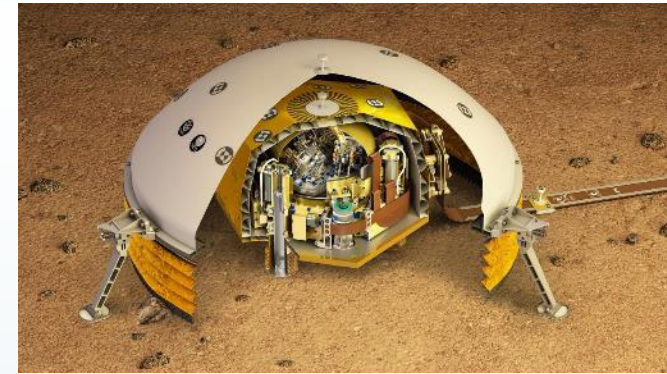


ze noi



19 m

Geofísica extraterrestre MARS Insight mission



<https://www.iris.edu/app/mars-monitor/map?format=text&nodata=404&minmagnitude=0&haslocation=2&f1=0&f2=0&orderby=time&starttime=2019-02-09>