



# I PENDOLI DELLA GROTTA GIGANTE

SOURCE: CARLA BRAITENBERG, ILDIKO' NAGY, STEFANO PAPACCHIOLI  
[HTTPS://WWW.BOEGAN.IT/2017/12/I-PENDOLI-DELLA-GROTTA-GIGANTE/](https://www.boegan.it/2017/12/i-pendoli-della-grotta-gigante/)

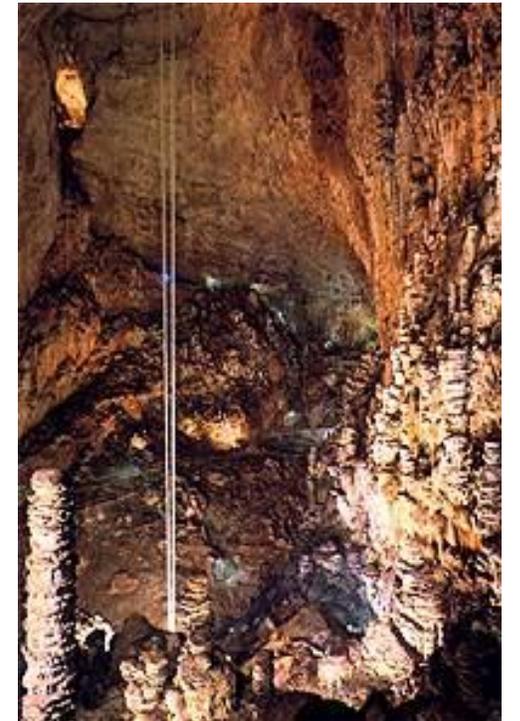


# INTRODUZIONE

I pendoli della Grotta Gigante sono strumenti sensibilissimi, che rilevano i movimenti della crosta terrestre.

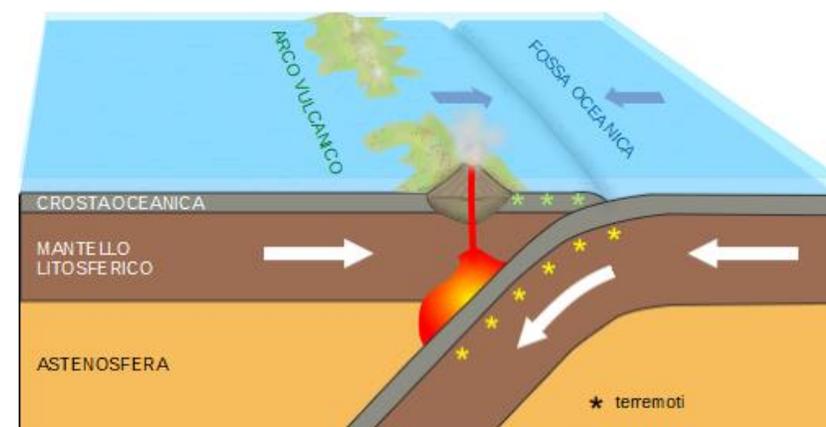
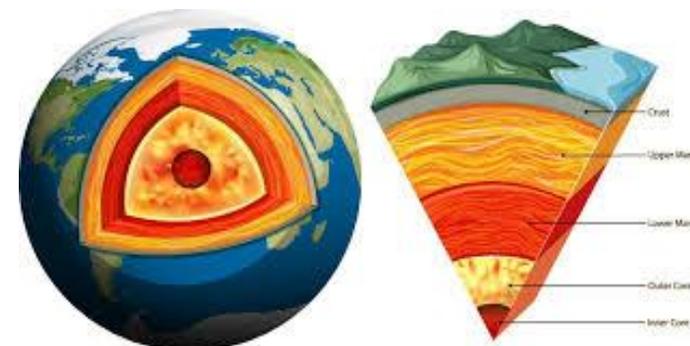
In particolare, rilevano i movimenti crostali che producono una deformazione di taglio o una rotazione della grotta e le oscillazioni orizzontali del terreno causate dall'irradiazione di onde sismiche.

La grotta non è ferma e immobile (come non lo è la superficie terrestre) → sono necessarie strumentazioni specifiche per evidenziare le continue deformazioni della crosta terrestre e separare i molteplici fattori di natura diversa che ne sono le cause (Zadro e Braitenberg, 1999).



# DEFORMAZIONE DELLA CROSTA E TETTONICA A PLACCHE

- Interno della terra stratificato e suddiviso in base alla composizione chimica in: **nucleo, mantello e crosta.**
- **Litosfera** → guscio esterno rigido della terra, costituito da mantello superiore e crosta.
- La crosta ha uno spessore che varia dagli 8 ai 70 km, con il minimo in corrispondenza degli oceani e il massimo sotto i rilievi montuosi.
- La litosfera è spessa in media 100 km, con spessori minimi in corrispondenza delle dorsali oceaniche e massimi in corrispondenza dei cratoni, le zone più antiche della crosta.
- La teoria moderna della tettonica a placche suddivide la **litosfera** in un certo numero di **placche o zolle**, le **principali** delle quali sono **dodici**, fra le quali le placche **Eurasiatica, Africana, Nord-Americana, Sud-Americana e Pacifica.**
- La forma attuale delle zolle è un'istantanea di un processo che dura da milioni di anni e nel quale le placche si spostano di migliaia di chilometri, modificando di continuo l'aspetto della superficie terrestre e la suddivisione in forme emerse e oceani.
- La **velocità** di spostamento delle placche è dell'ordine di qualche centimetro all'anno → può essere misurata utilizzando diverse tecniche satellitari **GNSS** (Global Navigation Satellite System)/**SLR** (Satellite Laser Ranging)/**VLBI** (Very Long Baseline Interferometry).



- Due placche attigue in movimento relativo (convergente o trascorrente) interagiscono tra loro, provocando forze d'attrito lungo i margini di placca e deformazioni della crosta.
- Il movimento convergente provoca lo scontro delle placche: accade allora che una delle due sovrascorra sull'altra, flettendola verso il basso nel mantello sottostante, oppure che esse s'incastriano l'una nell'altra e si flettano verso il basso.
- Una situazione di questo tipo si presenta per esempio in corrispondenza dello scontro fra le **placche Indiana ed Eurasiatica** sotto la catena del **Himalaya** e l'altipiano del **Tibet**, oppure lungo la costa occidentale del Sudamerica sotto la catena delle **Ande**, e presumibilmente anche sotto le **Alpi**.
- I margini di placca sono caratterizzati da attività sismica e vulcanica: tali attività infatti non sono distribuite uniformemente su tutto il globo terrestre, ma sono concentrate lungo bande ben definite, che orlano i margini delle placche litosferiche.
- La regione del Friuli-Venezia Giulia è interessata da una fascia sismica che segue il margine della cosiddetta micro-placca Adria nel suo contatto con la placca Eurasiatica (Figura 1). Il movimento della placca Adria rispetto alla placca Eurasiatica è in direzione nord. A seconda dell'orientazione del margine, esso provoca un movimento relativo che diviene da convergente a trascorrente quando si va dall'area a ovest del Tagliamento verso il confine sloveno.

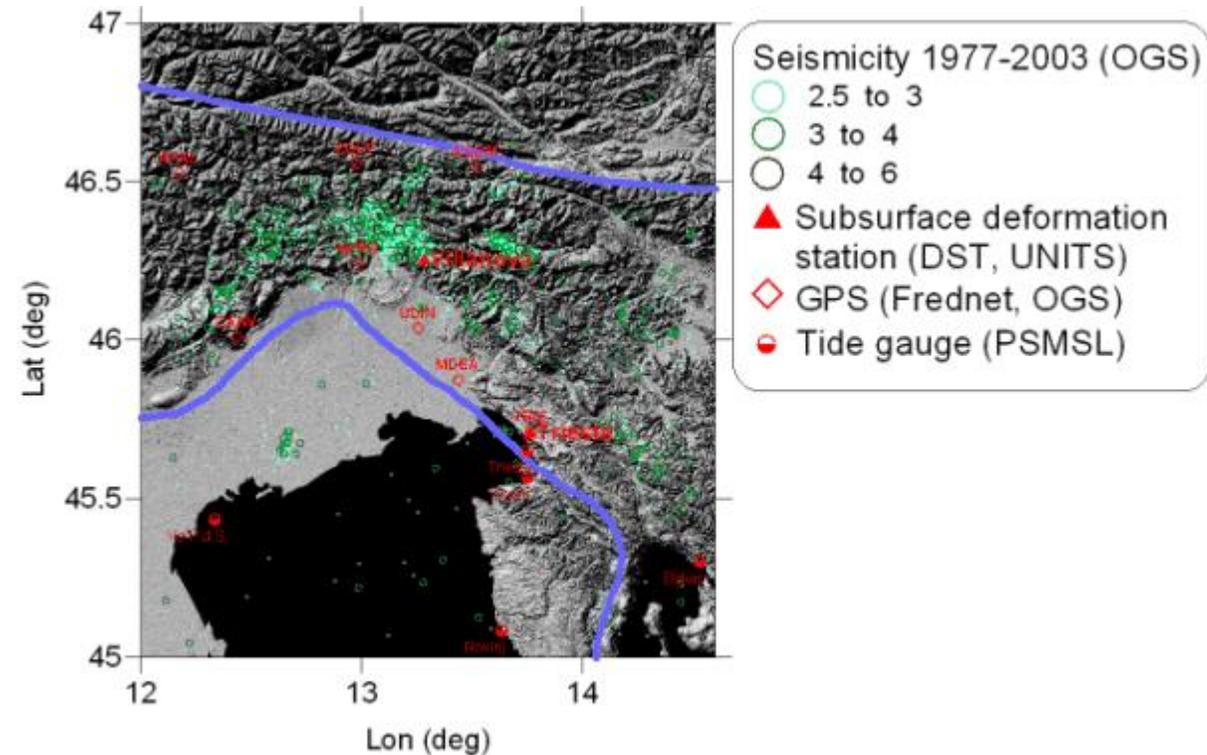
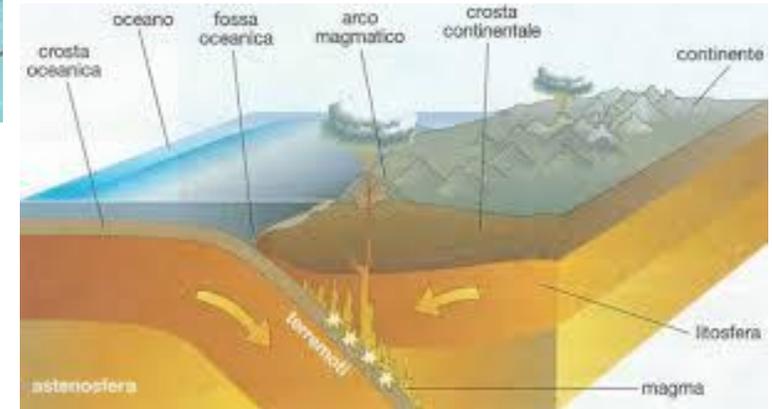
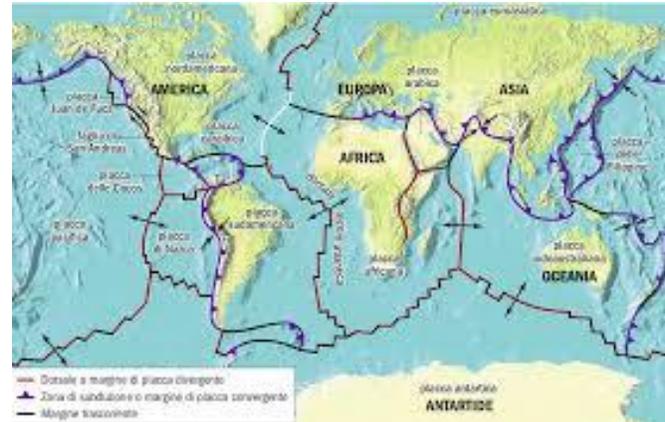


Figura 1 sismicità rilevata dalla rete sismologia dell'OGS (OGS, 2003) sovrapposta ad un modello digitale del terreno del Friuli-Venezia Giulia ed aree limitrofe rilevato dallo Space-Shuttle (SRTM, 2004)

Non sempre il movimento relativo fra due placche provoca fenomeni sismici lungo il margine → lo scivolamento può avvenire senza attrito.

Laddove invece l'attrito è maggiore e impedisce lo scivolamento, la crosta viene deformata fino a quando gli sforzi elastici superano il limite di rottura, e la crosta cede improvvisamente, rilasciando energia in forma di **onde sismiche** e causando un **terremoto**.

E' possibile osservare questi movimenti della terra tramite le **misure di deformazione** effettuate **nel sottosuolo in cavità naturali o artificiali o nelle perforazioni**



- Un'altra impostazione consiste nelle misure effettuate in superficie con metodi geodetici e astro-geodetici. La corretta individuazione dei movimenti e delle deformazioni tettoniche richiede anni di osservazioni ripetute nel tempo/o continue.
- La coppia di pendoli della Grotta Gigante registra tale movimento con continuita' dal 1966, e presenta quindi una serie temporale di 4 decenni con poche interruzioni.
- Le registrazioni dei pendoli sono illustrate nella Figura 2a, dove le serie temporali sono riportate per le due componenti NS ed EO.
- Le registrazioni coprono un intervallo di quasi 40 anni: il segnale e' composto da un'oscillazione annuale piuttosto regolare, che puo' essere attribuita a effetti termici e termo-elastici.
- Sovrapposti alla variazione annuale si osservano segnali di breve periodo, di forma anche impulsiva, che devono essere considerati uno per uno (**in alcuni casi sono attribuibili a piene eccezionali del fiume sotterraneo Timavo**).
- Un altro segnale evidente e' la variazione di lungo periodo, che in Figura 2a e' stata interpolata a scopo illustrativo mediante una funzione polinomiale.
- Si puo' osservare come la variazione di lungo periodo e' correlata nelle due componenti NS ed EO, indicando una direzione preferenziale delle variazioni, orientata lungo la direzione NO-SE e parallela alla catena delle Alpi Dinariche. Si puo' anche notare che l'inclinazione e' orientata verso SE durante gli anni dal 1966 al 1976/1978, poi inverte la direzione verso NO fino al 1996/1998, e infine riprende la direzione verso SE. Mediamente, nei quattro decenni, l'inclinazione registrata e' stata di 9 msec/anno verso NO, e rappresenta la deformazione causata dallo scontro fra placca Adria e placca Eurasiatca. Nella Figura 2b e' rappresentato l'andamento del vettore d'inclinazione, dove le diverse tonalita' di grigio indicano l'evoluzione nel tempo.

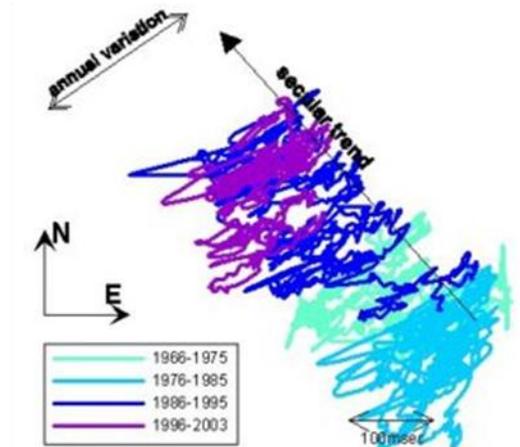
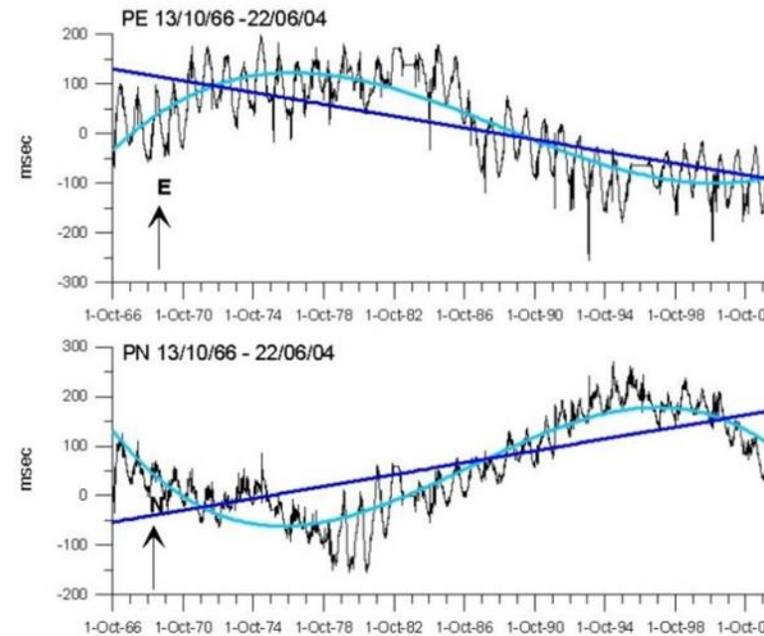


Figura 2 – La registrazione dei pendoli della Grotta Gigante dal 1966 fino a 2004:

- le serie temporali delle componenti NS ed EO. Interpolazione con polinomio di 3. grado e variazione lineare media,
- andamento del vettore di inclinazione per lo stesso periodo.

# FUNZIONAMENTO DEI PENDOLI ORIZZONTALI DELLA GROTTA GIGANTE

I pendoli della **Grotta Gigante** furono costruiti all'inizio degli anni '60 allo scopo di registrare tutte le **deformazioni alle quali e' sottoposta la Grotta Gigante**. Una prima versione dei pendoli fu installata già negli primi anni sessanta dal Prof. Antonio Marussi (Marussi, 1960). I pendoli **sono unici al mondo per le loro grandi dimensioni, il che li rende particolarmente sensibili. La loro particolare costruzione permette di osservare minimi spostamenti relativi fra due punti A e B posti rispettivamente sul fondo e sulla volta della grotta** (vedi Figura 3).

Le grandi dimensioni dei pendoli, **che hanno una distanza fra attacco inferiore (A) e superiore (B) di 95 m**, li rendono strumenti **poco sensibili alle sorgenti di rumore**, e al contempo li dotano di **elevata sensibilita' alle deformazioni tettoniche** (Braitenberg, 1999; Braitenberg et al., 2001).

L'asta del pendolo e' sospesa orizzontalmente da due fili in acciaio di diametro 0.6 mm, quello superiore fissato sulla volta (punto B), quello inferiore sul fondo della grotta (punto A).

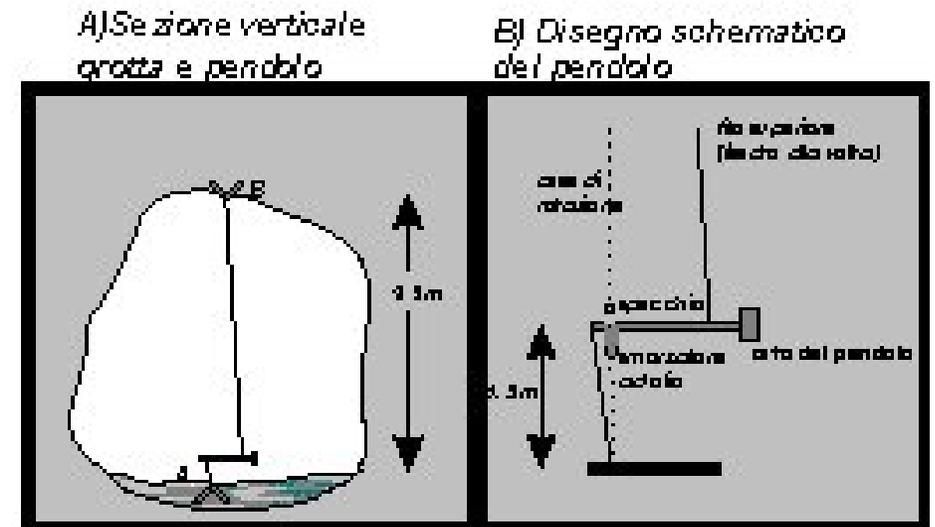


Figura 3 a,b – Illustrazione schematica della costruzione del pendolo della Grotta Gigante: a) la sospensione del pendolo nella Grotta. A e B rispettivamente sono i **punti d'attacco inferiore e superiore nella Grotta**, b) schema dell'asta del pendolo orizzontale con specchietto e smorzamento a olio.

# FUNZIONAMENTO DEI PENDOLI

La figura 3 illustra schematicamente la costruzione del pendolo. **L'asta del pendolo può ruotare nel piano orizzontale intorno ad un asse di rotazione formato dalla congiungente dei due punti A e B.** La rotazione viene rilevata da un raggio luminoso riflesso dallo specchietto montato sull'asta del pendolo, in corrispondenza dell'asse di rotazione. Attualmente il fascio luminoso riflesso viene captato da due sistemi in parallelo, uno (quello originale) che impiega carta fotografica e uno di tipo **elettronico**. Il dispositivo elettronico è stato costruito presso l'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia).

L'acquisizione digitale ha rivoluzionato lo strumento, in quanto permette una campionatura veloce (30 campioni/sec), tipica dei sismografi, e una grandissima risoluzione del segnale rilevato (10-11 radianti), il che corrisponde ad uno spostamento orizzontale relativo del punto B, posto sulla volta, rispetto al punto A, posto sul fondo della grotta di **un solo milionesimo di millimetro**, su una distanza fra i due punti A e B di 95 m.

I dati acquisiti con il sistema digitale vengono registrati su un PC situato nella grotta, che consente un collegamento remoto via rete. I dati dei pendoli vengono regolarmente controllati e archiviati da personale del Dipartimento di Matematica e Geoscienze. La Figura 3c illustra schematicamente la risposta del pendolo all'inclinazione di un parallelepipedo nel quale fosse montato. **In natura il parallelepipedo è costituito dalla grotta.**

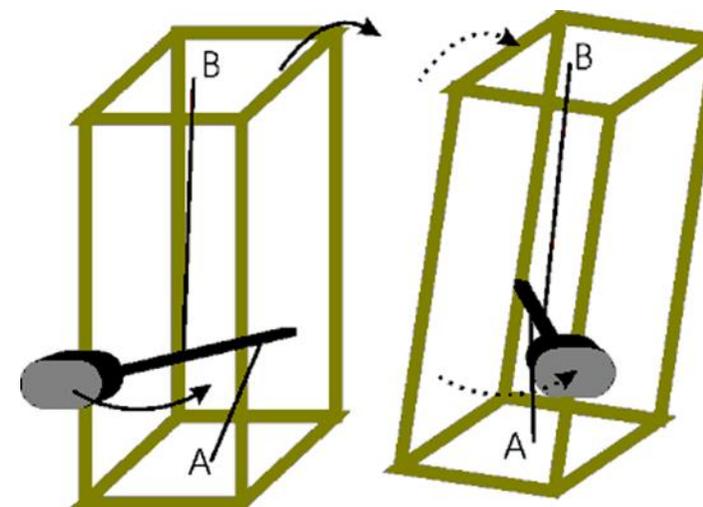
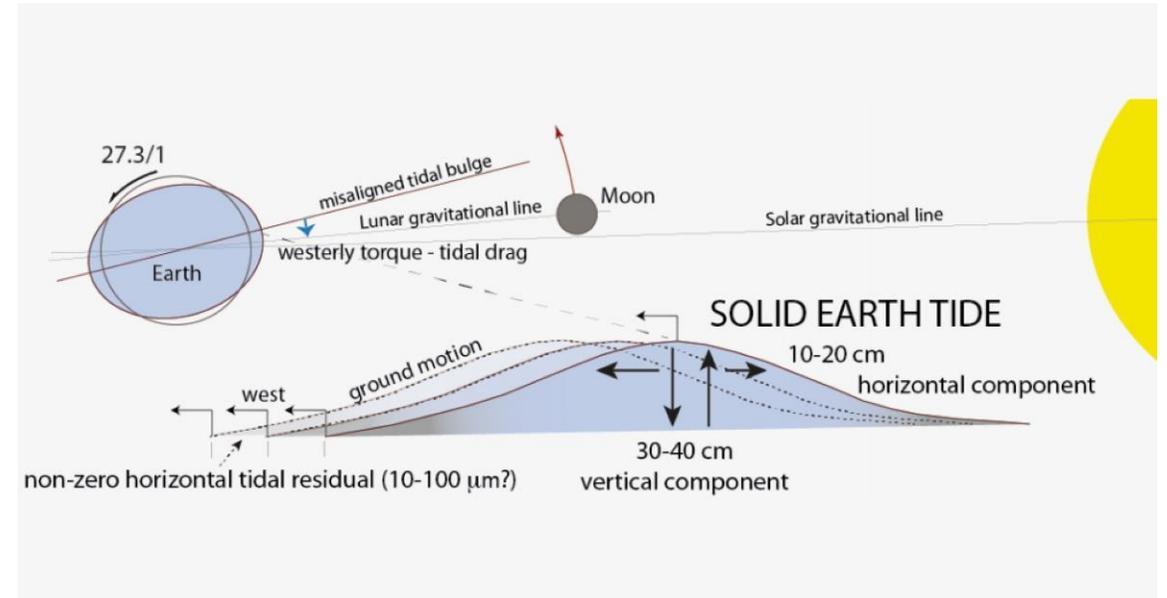


Figura 3c – Illustrazione schematica della costruzione del pendolo della Grotta Gigante: rotazione dell'asta del pendolo nel piano orizzontale in risposta a un'inclinazione del dispositivo nel quale è montato (che in natura corrisponde alla Grotta).

- A causa dello spostamento delle placche litosferiche, la crosta terrestre si deforma e subisce improvvisi cedimenti lungo piani di frattura, o piani di faglia. Le **deformazioni rilevate dai pendoli, tuttavia sono l'effetto complessivo di molte cause, di natura molto diversa tra loro.**
- Maree terrestri e maree di carico: un effetto relativamente ampio è dovuto all'attrazione gravitazionale di luna e sole. A causa della forza di gravità, la terra nel suo insieme assume una forma più ellissoidica che sferica, allungata rispettivamente lungo la congiungente terra-luna o terra-sole.
- Rispetto alla posizione media, **il suolo della superficie terrestre si alza e si abbassa periodicamente di qualche decina di centimetri, e ciò provoca una deformazione della crosta.** E' possibile calcolare con grande precisione questo movimento della terra.



# INCLINAZIONI DEI PENDOLI

- Nella **figura 4** si confronta l'inclinazione dei pendoli della Grotta Gigante che si avrebbe per il solo effetto della **marea terrestre** (**figura 4c**) con quella **effettivamente osservata** (**figura 4a**).
- Si può vedere che i due segnali sono molto diversi, anche se entrambi presentano oscillazioni che si ripetono con periodicità' diurne e semidiurne.
- La discrepanza è dovuta al fatto che la stazione della **Grotta Gigante** è vicina all'**Adriatico** e risente del **carico delle maree marine**.
- **L'ampiezza delle oscillazioni di marea marina nel golfo di Trieste è dell'ordine di 50 cm**, come indica la **figura 4e**.
- **I pendoli risentono sia dell'attrazione gravitazionale delle masse d'acqua sia della deformazione dovuta alla variazione di carico**: infatti **la crosta terrestre subisce una flessione elastica per un aumento del carico superficiale a seguito dell'aumento del livello marino**. Nella **figura 4d** è riportato **l'effetto del carico sull'inclinazione della grotta Gigante**, e nella **figura 4b** **il segnale d'inclinazione teorico**, somma della marea terrestre e dell'effetto del **carico marino**.

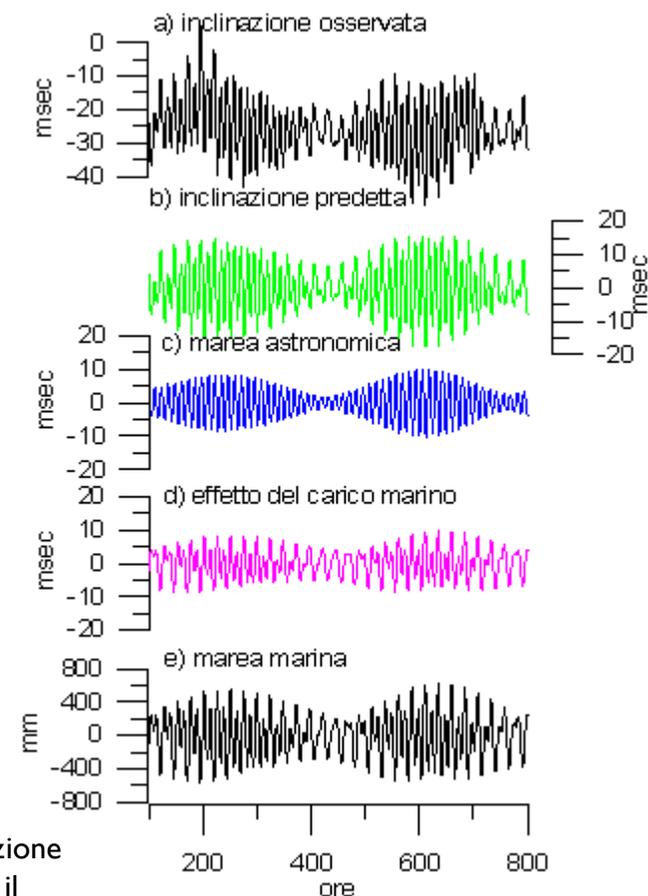
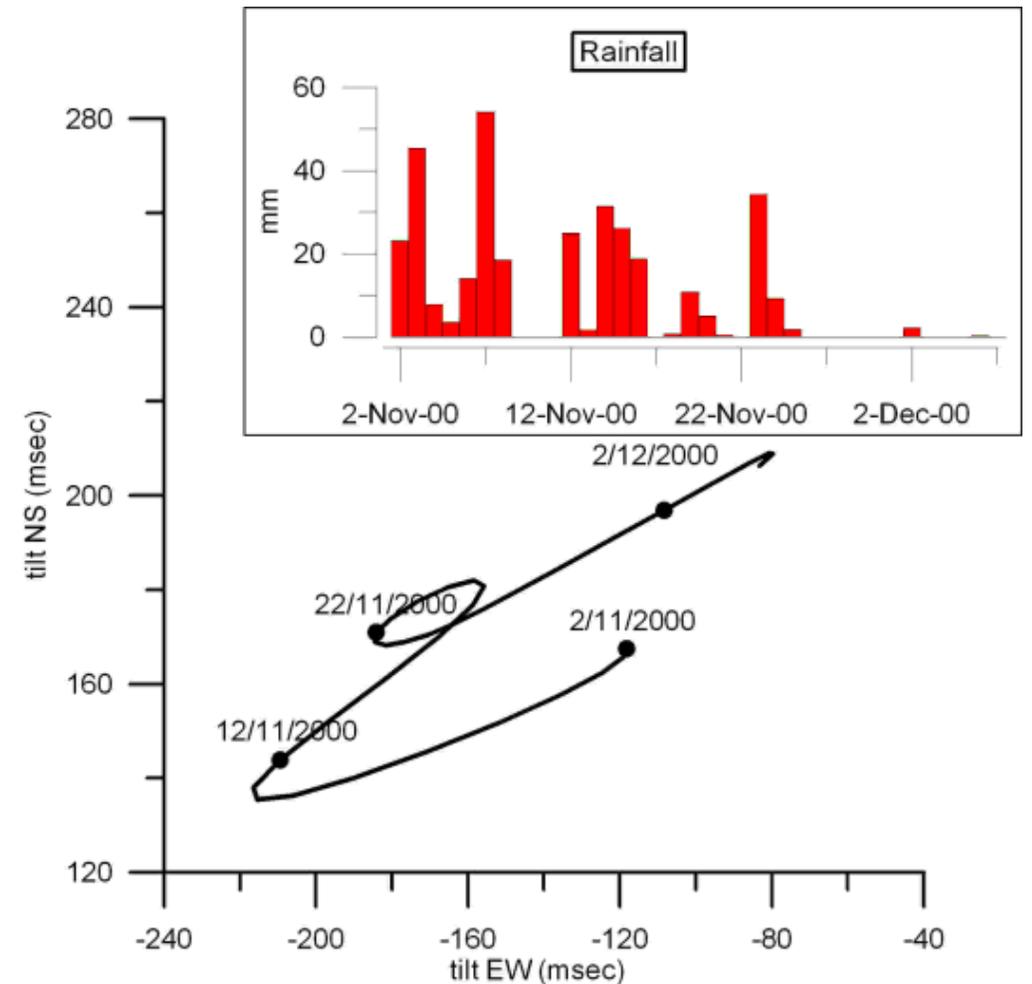


Figura4 Esempio dell'inclinazione in direzione NS per effetto di marea: a) inclinazione osservata dal pendolo NS; b) inclinazione teorica considerando l'effetto complessivo della marea terrestre e del carico marino; c) inclinazione teorica considerando il solo effetto della marea terrestre; d) inclinazione teorica dovuta al carico della marea marina; e) oscillazione del livello della marea marina teorica per la stazione di Trieste

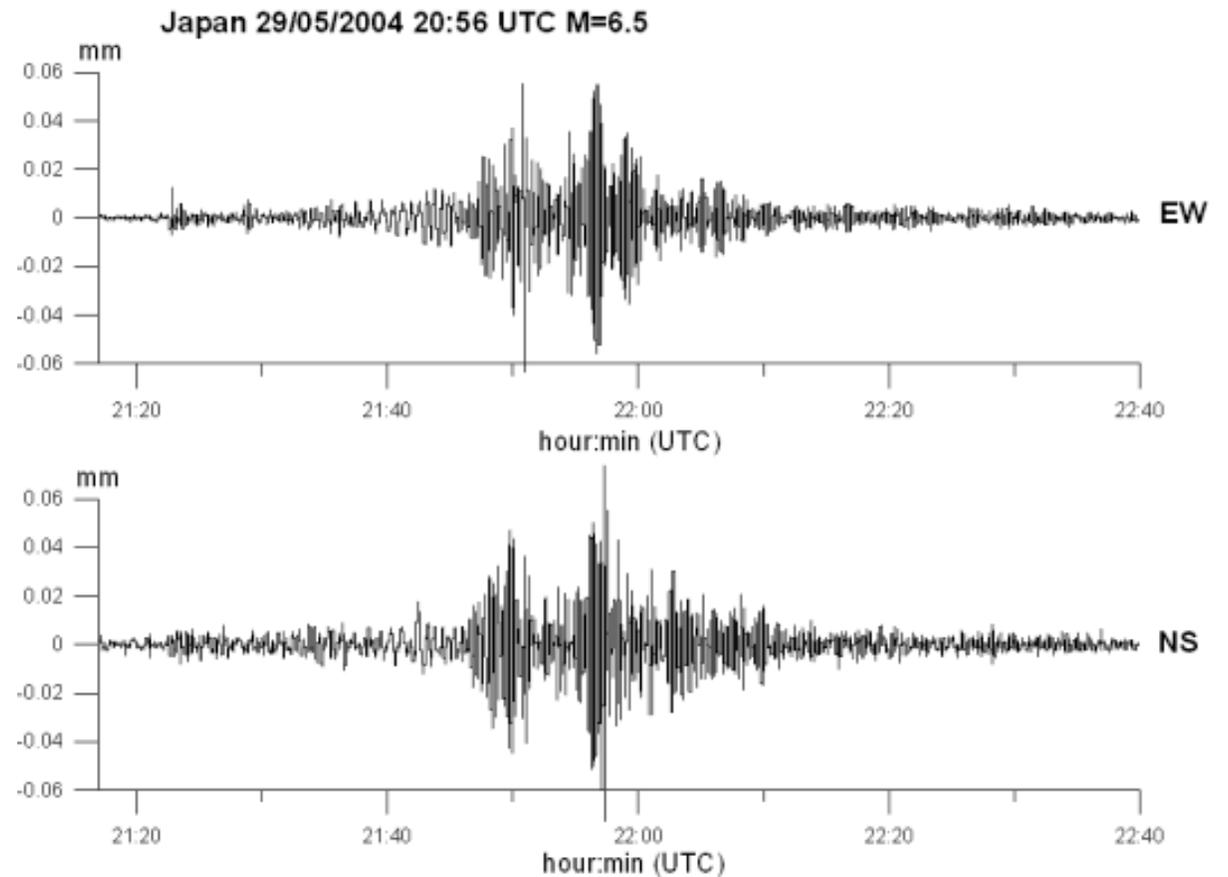
- Alle piene del fiume sotterraneo Timavo: si puo' attribuire un segnale di tipo aperiodico registrato dai pendoli, che si presenta in seguito a forti precipitazioni. A titolo illustrativo nella **figura 5** e' illustrato l'episodio di piena avvenuto ai primi di novembre del 2000. Il grafico mostra l'inclinazione osservata, la cui direzione e' sempre la stessa dopo grosse piogge ed e' orientata verso SO. Nella figura e' anche riportato l'andamento temporale della precipitazione piovosa durante lo stesso periodo.

Figura 5 – a) Inclinazione osservata della coppia di pendoli causata da una piena del fiume sotterraneo Timavo; b) registrazione delle precipitazioni piovose nello stesso periodo.



- Onde sismiche: il sistema elettronico d'acquisizione dei dati dei pendoli permette di osservare le onde sismiche emesse da un evento sismico.
- Nella **figura 6** e' rappresentata la registrazione di un **evento sismico avvenuto in Giappone, il 29 maggio 2004, di magnitudo  $M=6.5$** . Le curve illustrano lo spostamento del terreno nelle direzioni NS ed EO.

Figura 6 – Registrazione delle onde sismiche emesse dall'evento giapponese del 29 maggio 2004, di magnitudo  $M=6.5$  effettuata con i pendoli della Grotta Gigante.



# CONCLUSIONI

- Le grandi dimensioni della Grotta Gigante fanno dei pendoli orizzontali in essa installati una coppia di strumenti unici al mondo.
- L'ottima manutenzione, garantita dall'Istituto di Geodesia e Geofisica prima e attualmente dal Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università di Trieste, ha permesso di fornire una serie temporale lunga quattro decenni di osservazioni dell'inclinazione della verticale. **I dati indicano un'inclinazione media verso NO del punto di misura, che corrisponde al movimento della crosta causato dallo scontro della placca Adria con la placca Eurasiatica.** Il segnale fornito dai pendoli è la somma delle deformazioni della grotta dovute a cause molteplici. Oltre al movimento tettonico citato sopra, gli effetti più importanti sono dovuti alla **marea terrestre, al carico della marea marina, alle piene del fiume sotterraneo Timavo e agli eventi sismici.** L'acquisizione digitale, effettuata grazie ad un intervento dell'INGV, ha consentito di allargare la banda di osservazione degli strumenti, che sono così diventati clinometri a larga banda, in quanto permettono di seguire le inclinazioni della grotta, che vanno dai movimenti secolari a quelli sismici. È da ricordare che **per i tre anni precedenti il disastroso sisma Friulano del 6 maggio 1976 i pendoli hanno registrato oscillazioni anomale aventi una periodicità di qualche minuto, che sono cessate in concomitanza con il terremoto.** Dopo l'evento queste oscillazioni sono state interpretate come movimenti precursori (Zadro, 1978; Bonafede et al., 1986). Fino a oggi quei segnali non si sono ripetuti, ma se in futuro si ripetessero potrebbero fornire un campanello d'allarme. Altre stazioni sotterranee per il monitoraggio della deformazione con strumenti di grandi dimensioni (>40 m) sono in funzione oggi in Giappone, California e Belgio.