

Terremoti, Chandler Wobble e Centrali Nucleari

Non sono un esperto e l'argomento non è dei più semplici, ma credo che ciò che venga colpito dai terremoti che avvengono secondo le modalità ed entità di quello giapponese sia, sostanzialmente, il Chandler Wobble o oscillazione di Chandler.

Dalla fisica sappiamo che un corpo non perfettamente sferico non ruota intorno ad un singolo asse. E' questo il caso dei pianeti e dunque anche il caso della nostra terra, il cui geoide sappiamo non essere perfettamente sferico. Tuttavia dobbiamo accettare la non perfetta coincidenza dell'asse di rotazione terrestre con l'asse di massimo momento d'inerzia o asse baricentrico, senza una sua dimostrazione, perché per poterlo fare occorrerebbe chiamare in causa il calcolo tensoriale. Possiamo, però, osservare figura 1 seguente per avere una visione intuitiva del fenomeno.

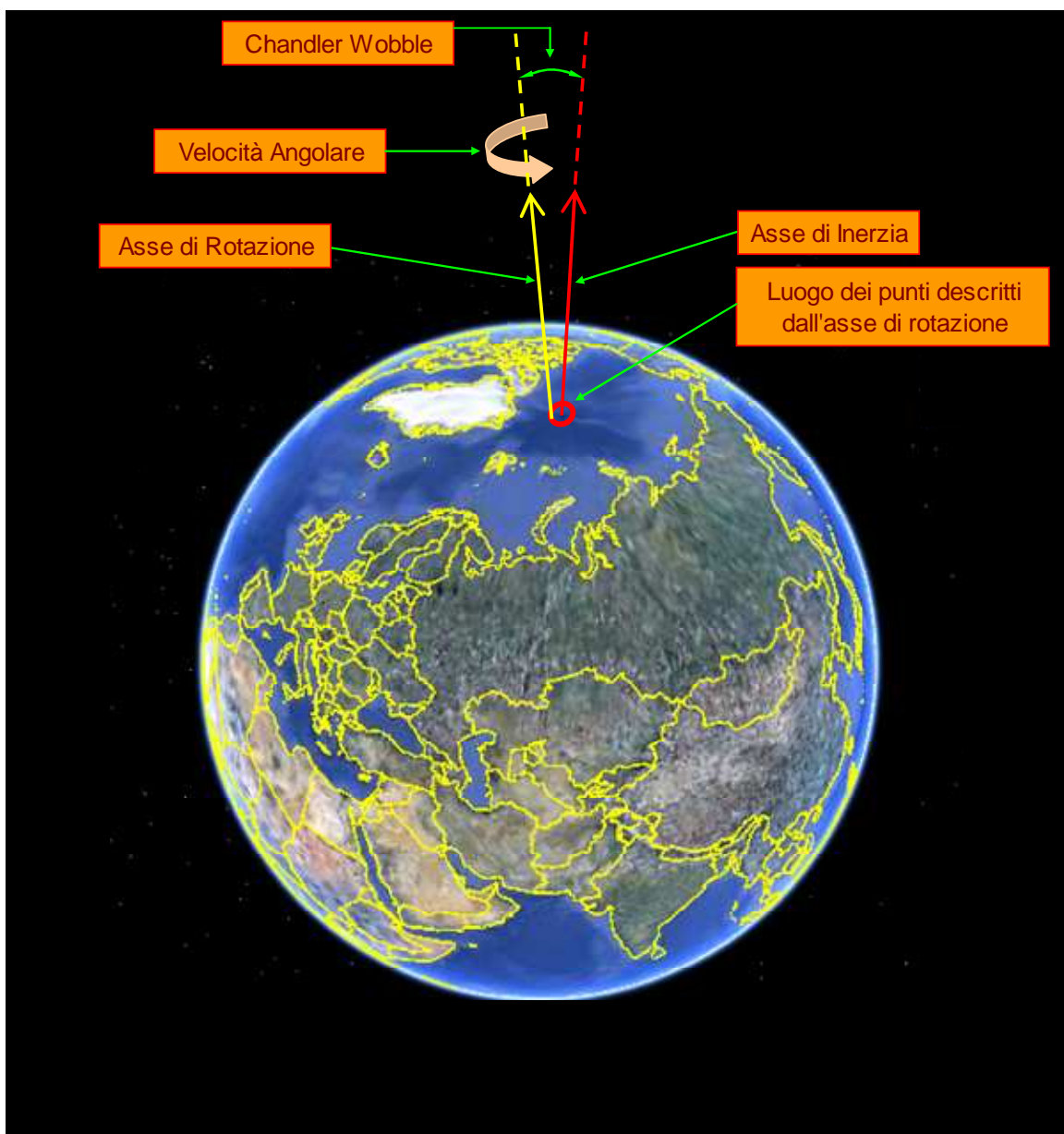


Figura 1 – Luogo dei punti descritti dal Chandler Wobble

La precedente figura ci mostra come la Terra non ruoti uniformemente intorno al proprio asse. Il risultato è mostrato dal cerchio rosso indicato come il luogo dei punti

descritti dall'asse di rotazione. Tale cerchio ha una dimensione di circa $10 \div 13$ metri. In tutti i casi, occorre ricordare che il Chandler Wobble non è il solo movimento possibile, esso infatti si aggiunge a precessione e nutazione.

Fermiamoci qui con questo argomento e iniziamo a dire che, sulla Terra, ogni fenomeno che sia in grado di ridistribuire la massa è in grado di influenzare il Chandler Wobble. Tuttavia non tutti i terremoti possono produrre effetti rilevanti in questo senso. Cerchiamo di capire perché guardando alla geologia del nostro pianeta. Come sappiamo la crosta terrestre è divisa in una ventina di placche o zolle (Plate Tectonics). Le placche si muovono sull'astenosfera, per un effetto indotto, dalle grandi celle convettive che si originano nelle profondità del nostro pianeta (mantello). Le figure 2 e 3 seguenti, dovrebbero essere esplicative della divisione della crosta in placche o zolle e del motore che spinge le zolle nel loro movimento.

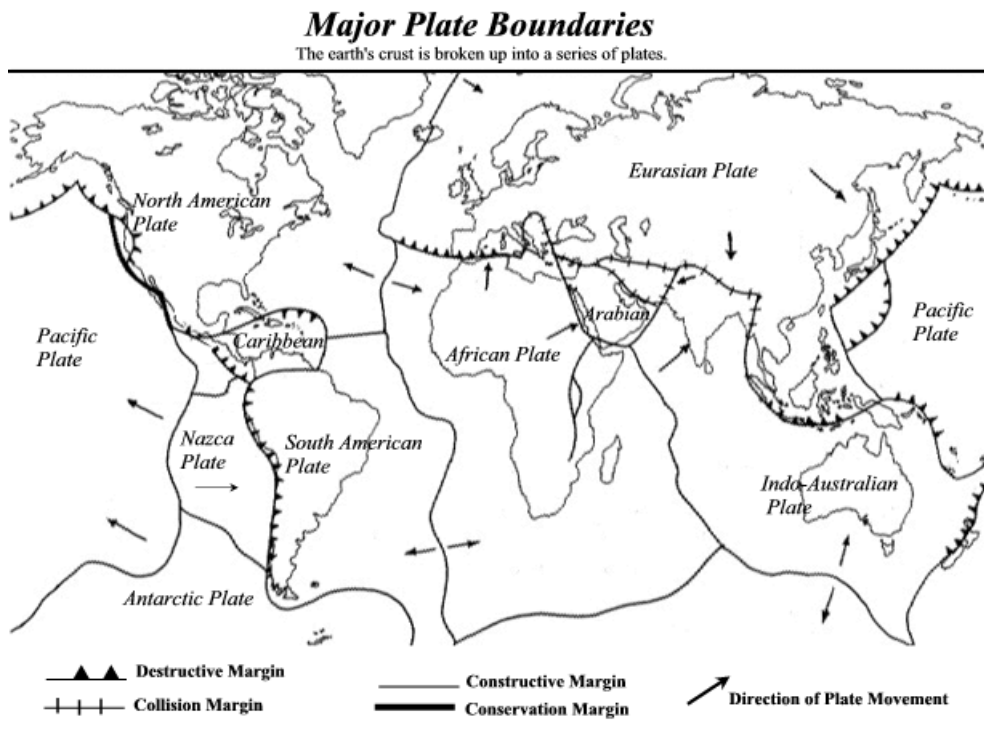


Figura 2 - Crosta Terrestre e zolle - <http://cgz.e2bn.net/>

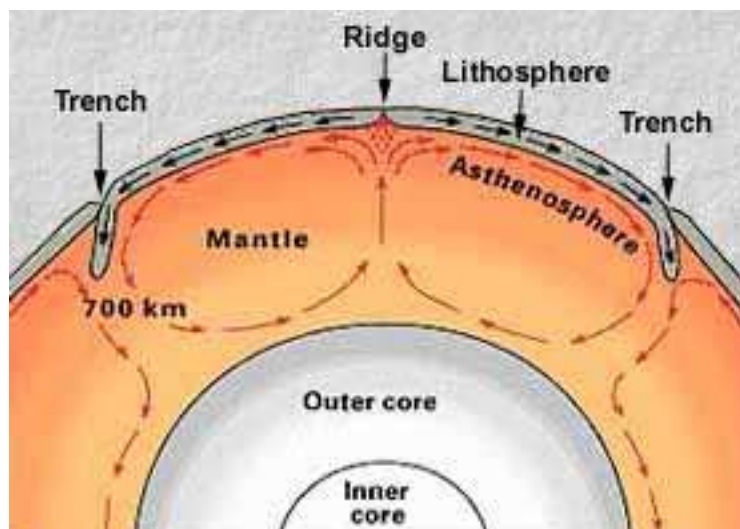


Figura 3 - Motore delle zolle - <http://geology.csupomona.edu>

Le placche tettoniche possono muoversi con le seguenti tre modalità diverse:

- Movimento divergente
- Movimento convergente
- Movimento trascorrente

Si veda la figura 4 per una spiegazione intuitiva.

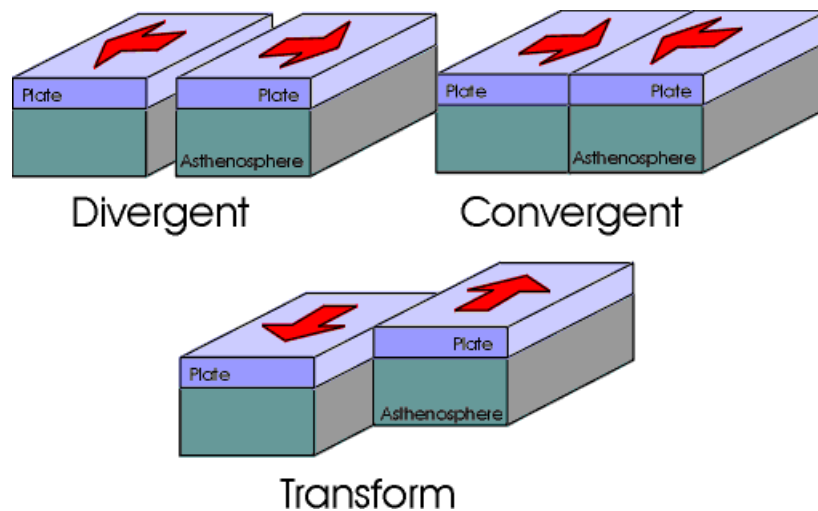


Figura 4 - Movimenti possibili per le zolle -

<http://geology.csupomona.edu/drjessey/class/Gsc101/Plate.html>

Ora proviamo ad analizzare che cosa avviene durante i tre tipi di movimenti indicati nella precedente figura. Nel caso della divergenza di due zolle tettoniche, il movimento è, evidentemente, orizzontale rispetto all'asse di rotazione e al raggio del geode terrestre. Come si evince dalla figura 5.

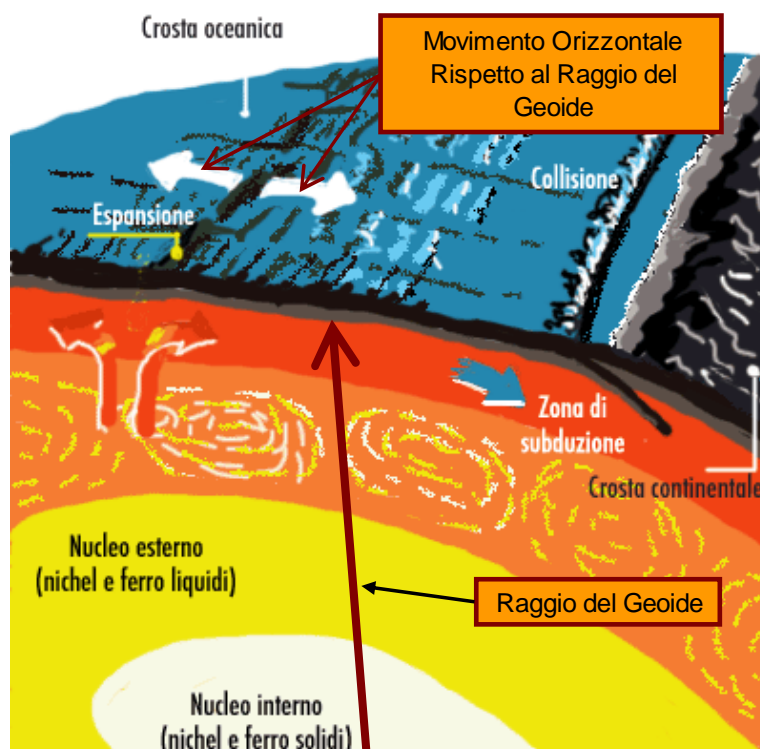


Figura 5 - Modificata da: <http://www.geoenv.it>

La stessa cosa avviene con il movimento trascorrente tra le zolle, si veda la prossima figura 6.

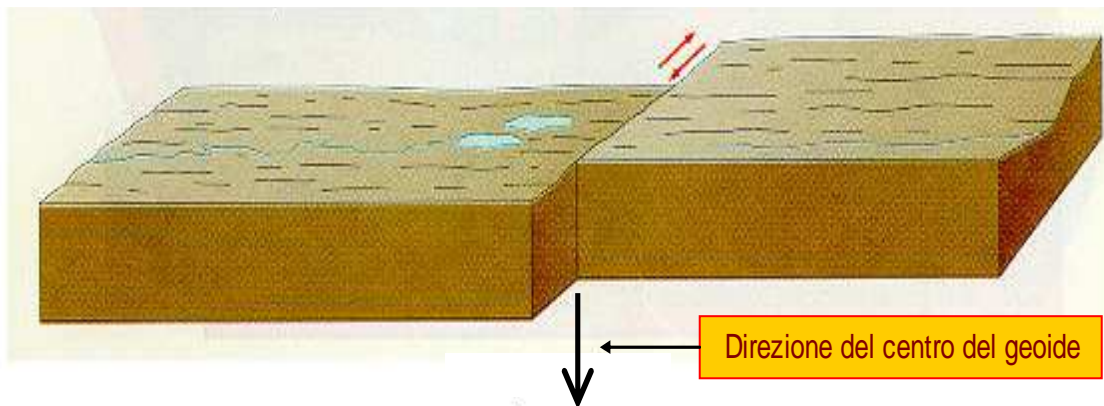


Figura 6 - Movimento trascorrente - <http://geology.csupomona.edu>

Dei tre movimenti possibili per le zolle, solo quelli convergenti hanno, come risultato, un movimento di masse il quale avviene in direzione abbastanza radiale. Tali movimenti infatti, hanno come conseguenza spostamenti di massa verso il centro del pianeta. Sostanzialmente, nei movimenti convergenti sono possibili tre configurazioni diverse nella tipologia, ma simili nella reologia⁽¹⁾. Le tre diverse configurazioni sono:

- Convergenza tra crosta oceanica e crosta oceanica.
- Convergenza tra crosta oceanica e crosta continentale.
- Convergenza tra due croste continentali.

In tutti i tre precedenti casi c'è la subduzione⁽²⁾ di una zolla sotto un'altra. Le manifestazioni superficiali sono, però, diverse.

- La prima configurazione crosta oceanica contro crosta oceanica, comporta la formazione di quello che è chiamato un arco insulare vulcanico. E' il caso del Giappone, isole Kurili, Filippine, Marianne ecc. Questo tipo di convergenza tettonica, finisce per creare una profonda fossa oceanica di fronte a un arco insulare mentre, dalla parte opposta dell'arco insulare, c'è sempre un mare chiuso tra l'arco insulare stesso e un avampese⁽³⁾ continentale.
- Nel secondo caso, la manifestazione superficiale è sempre una profonda fossa oceanica di fronte, questa volta, a una cordigliera costiera montuosa e vulcanica. E' il caso della cordigliera andina nel Sud America, prodotta dalla subduzione⁽²⁾ della zolla di Nazca sotto la zolla che sostiene il Sud America.
- Il terzo caso non presenta fossa oceanica, perché lo scontro avviene tra due croste continentali e in tal caso, ciò che avviene è un fenomeno d'orogenesi⁽⁴⁾. Da questo scontro nascono le catene montuose, come ad esempio le catene alpina e himalayana.

Nella prossima figura 7, è illustrata una situazione di subduzione⁽²⁾ tra due zolle convergenti. La cosa importante da osservare, è la cosiddetta zona o piano di Benioff. Ovvero quella particolare struttura, all'interno del mantello terrestre, che conduce la zolla che subduce verso il centro della Terra. Lungo la zona di Benioff, la zolla in subduzione⁽²⁾ preme per intrudersi nel mantello e, naturalmente, la zolla che sovrascorre esercita una funzione d'attrito meccanico. Quando la spinta supera la resistenza meccanica delle rocce lungo il contatto, avviene la rottura, lo

slittamento, e quindi la generazione d'un terremoto. Come si vede bene nella figura 7, il numero dei terremoti lungo il piano di Benioff è notevole.

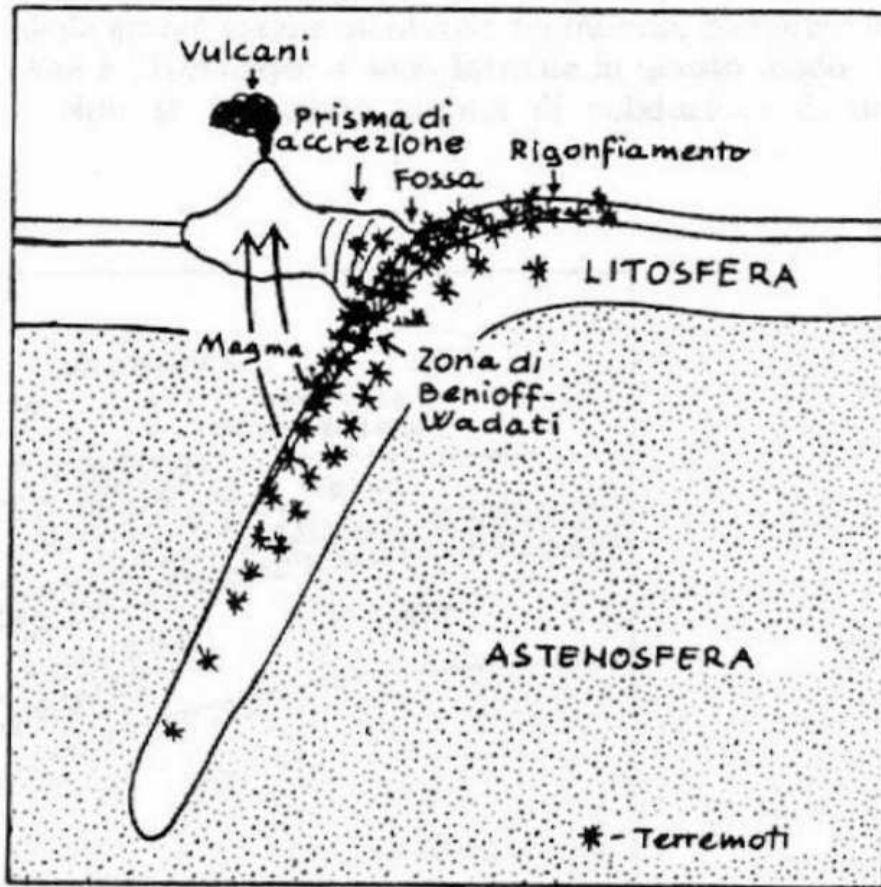


Figura 7 - Piano di Benioff - tratta da: P. Casati - Scienze della Terra.

Il piano di Benioff prende il nome proprio dal suo scopritore Hugo Benioff. Un fisico statunitense prestato prima all'astronomia e poi alla geologia-geofisica. Hugo Benioff, figura 8, interpretando varie misure sismiche ottenute dal giapponese Kiyoo Wadati, riuscì a stabilire l'esistenza di tale zona di subduzione⁽²⁾ nel mantello terrestre, molti anni prima che la teoria della tettonica a zolle fosse definitivamente accettata.



Figura 8 - Hugo Benioff - <http://www.seismolab.caltech.edu/history.html>

In pratica, Hugo Benioff si accorse che gli ipocentri dei terremoti registrati in una fascia distante una cinquantina di chilometri, al largo della costa occidentale degli Stati Uniti, giacevano su un piano inclinato a circa 33 gradi fino ad una profondità di 300 Km, mentre gli ipocentri ancora più profondi, giacevano su un piano con

inclinazione vicina a 60 gradi. Fu così che in una memoria del 1949: "Benioff Hugo (1949). *Seismic evidence for fault origin of ocean deeps. Bull. Geol. Soc. Am., 60, pag. 1837-1856*" apparve, per la prima volta, il concetto di piano o zona di Benioff-Wadati.

Il piano di Benioff è dunque una struttura geologica molto importante per il nostro argomento, in quanto è l'unica struttura tra quelle possibili, che spostano materiale e quindi massa, in una direzione vicina a quella radiale. Si veda la figura 9 seguente, che riguarda proprio la formazione di un arco insulare in relazione alla subduzione⁽²⁾, in un movimento convergente, di crosta oceanica contro crosta oceanica.

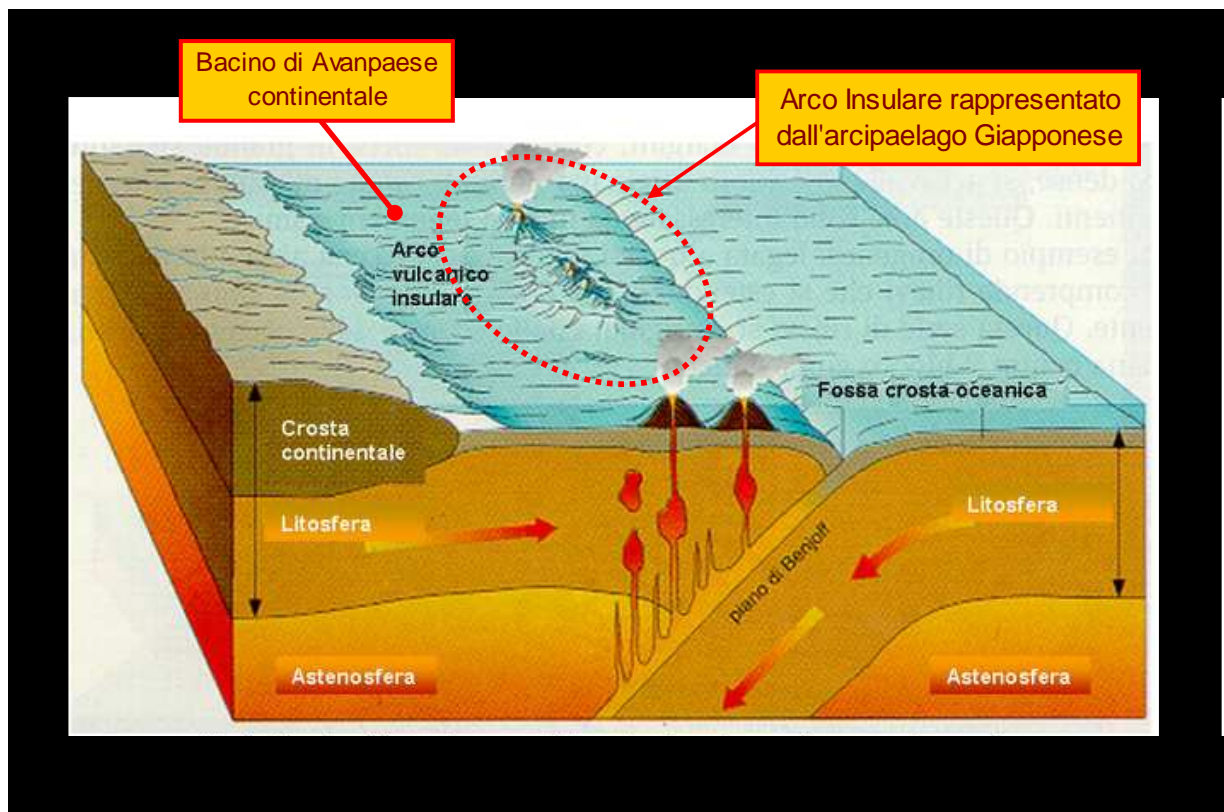


Figura 9 - Formazione di un arco insulare dovuto a subduzione sulla convergenza di croste oceaniche

Solo per fare un esempio della portata di un tale processo, basti sapere che nel più grande terremoto precedente a quello Giapponese avvenuto nel marzo 2011, quello di Sumatra del 26 dicembre 2004, il materiale che subduceva lungo il piano di Benioff è stato spinto diversi metri nel mantello terrestre, comprimendo ed elevando, al tempo stesso, la zona nord di Sumatra per altrettanti diversi metri. Inoltre è molto probabile che durante la prima violenta scossa di quel terremoto, si siano verificati grandi slittamenti nei fondali sottomarini. Così, in un intervallo di tempo abbastanza piccolo c'è stata una discreta redistribuzione di massa nell'interno del pianeta.

Ora perché mai dei tre movimenti possibili ci interessano soltanto quelli verticali e non quelli orizzontali?

La risposta si trova in una legge fisica che si chiama: "conservazione del momento angolare!".

Andiamo per gradi e incominciamo a cercare di capire che cosa s'intende per conservazione del momento angolare. Lo facciamo con un esempio. Un pianeta che descrive un'orbita ellittica soggetta a una forza centrale, conserva il momento angolare rispetto alla stella centrale, pertanto la sua velocità sarà tanto maggiore

quanto più r è piccolo. Dove con r s'intende la distanza dalla stella centrale. Il momento angolare è un vettore indicato con \mathbf{L} il cui modulo è:

$$|L| = mvr$$

mentre la direzione del vettore è, invece, quella dell'asse di rotazione. Dunque tenendo presente il prodotto che esprime il modulo $|L| = mvr$, nel caso del pianeta considerato prima è evidente che, durante la sua orbitazione, la massa non cambia. Tuttavia se la traiettoria è ellittica e la stella centrale è in uno dei due fuochi, mano a mano che il pianeta si avvicina al perielio il raggio r si riduce. Allora, per il principio di conservazione del momento angolare, per mantenere costante il prodotto visto precedentemente dovrà, per forza, variare la velocità. Analogamente per un corpo solido ruotante attorno ad un asse fisso, in assenza di momenti di forze esterne (o se la loro sommatoria è nulla), si conserva il momento angolare espresso dalla seguente:

$$\mathbf{L} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}$$

Un esempio chiaro di tale fenomeno che tutti noi, almeno una volta, abbiamo potuto osservare, è rappresentato dal pattinatore su ghiaccio che ruota su se stesso con una certa velocità di rotazione e a braccia aperte. Quando il pattinatore inizia a serrare le braccia, il momento angolare permarrà costante e il risultato sarà visto come in incremento della velocità di rotazione del pattinatore. Questo succede perché il momento d'inerzia di un corpo dipende dalla sua massa e da come essa è distribuita, il che significa:

- se la massa è maggiormente distante dall'asse di rotazione il momento d'inerzia aumenta. E' il caso del pattinatore che allarga le braccia.
- al contrario, si ha una situazione rovesciata se la massa è più vicina all'asse di rotazione. E' il caso del pattinatore che chiude le braccia.

Tenendo presente quanto scritto precedentemente, ovvero che il momento angolare è rappresentato dal prodotto del momento d'inerzia per la velocità angolare, quello che succede è molto semplice. Quando il pattinatore allarga le braccia il suo momento d'inerzia aumenta e, per la conservazione del momento angolare, la velocità angolare dovrà diminuire. Viceversa quando il pattinatore stringe le braccia al corpo, il suo momento d'inerzia diminuisce e pertanto la velocità angolare dovrà aumentare. Ma tutto ciò come si applica al nostro problema che riguarda il Chandler Wobble? Osserviamo nuovamente l'equazione che lega momento angolare con la velocità angolare:

$$\mathbf{L} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}$$

La precedente sembra un'equazione semplice, ma in realtà sono tre equazioni in una. Il momento angolare \mathbf{L} e la velocità angolare $\boldsymbol{\omega}$ sono vettori, mentre il termine \mathbf{I} , rappresenta una matrice simmetrica 3x3 detta tensore d'inerzia. Inoltre se esplicitiamo la precedente per la velocità angolare, vediamo che:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{I}^{-1}\mathbf{L}$$

Quindi se il tensore d'inerzia della terra cambia repentinamente, come avviene nei terremoti lungo il piano di Benioff (masse che repentinamente vengono spostate per diversi metri verso l'interno del mantello), il vettore velocità angolare dovrà variare

della misura necessaria per mantenere costante il momento angolare della Terra. Conseguentemente il vettore velocità angolare della terra punterà verso una differente posizione in cielo. A dimostrazione di quanto detto, Richard Gross del Jet Propulsion Laboratory di Pasadena ha calcolato che il terremoto indonesiano, che pure ha causato un potente Tsunami, ha avuto i seguenti effetti:

- Cambiamento nella lunghezza del giorno pari a: -2,676 microsecondi.
- Eccitazione del movimento polare in X = -0,670 miliardesimi di secondo
- Eccitazione del movimento polare in Y = 0,475 miliardesimi di secondo

Tutto ciò ha senso in quanto lo slittamento di masse lungo il piano di Benioff, produce un dislocamento di massa verso il centro della Terra e quindi, come nel caso del pattinatore che chiude le braccia, per il principio di conservazione del momento angolare, la velocità angolare terrestre deve aumentare riducendo, contemporaneamente, la durata del giorno. Con tutto ciò, risulta anche spiegato perché solo certi tipi di terremoti, quelli appunto legati alle zone di subduzione⁽²⁾ (spostamenti di massa in direzione radiale), producono effetti sul Chandler Wobble. Anche qui, naturalmente, se osserviamo i dati indicati da Richard Gross del Jet Propulsion Laboratory di Pasadena, nessun allarmismo è giustificato in quanto, agli effetti pratici, i valori di cambiamento nella lunghezza del giorno o quelli d'eccitamento del movimento polare, si possono considerare del tutto inavvertibili a livello umano.

Ancora alcune osservazioni. La successiva figura 10 mostra l'epicentro dell'ultimo disastroso terremoto giapponese.

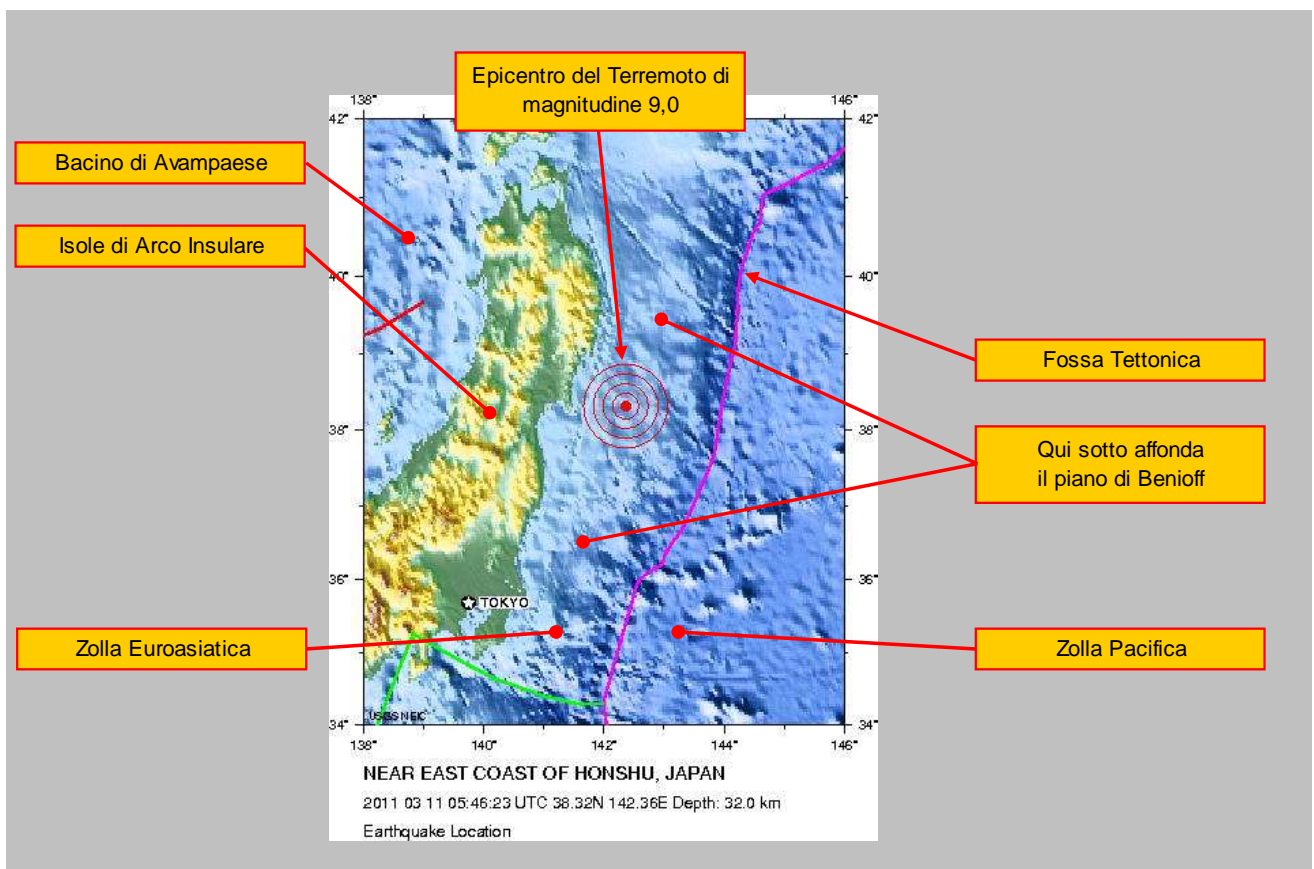


Figura 10 – Epicentro del terremoto del 21/03/2011 in Giappone

Sempre nella stessa figura, la linea fucsia indica dove si trova la fossa tettonica dovuta alla subduzione⁽²⁾ della zolla pacifica sotto quella eurasiatica. Ora, se

osserviamo l'andamento della sismologia storica a nord di Tokio, verso Fukushima per intenderci, rappresentato nella figura 11 seguente, emerge una situazione curiosa.

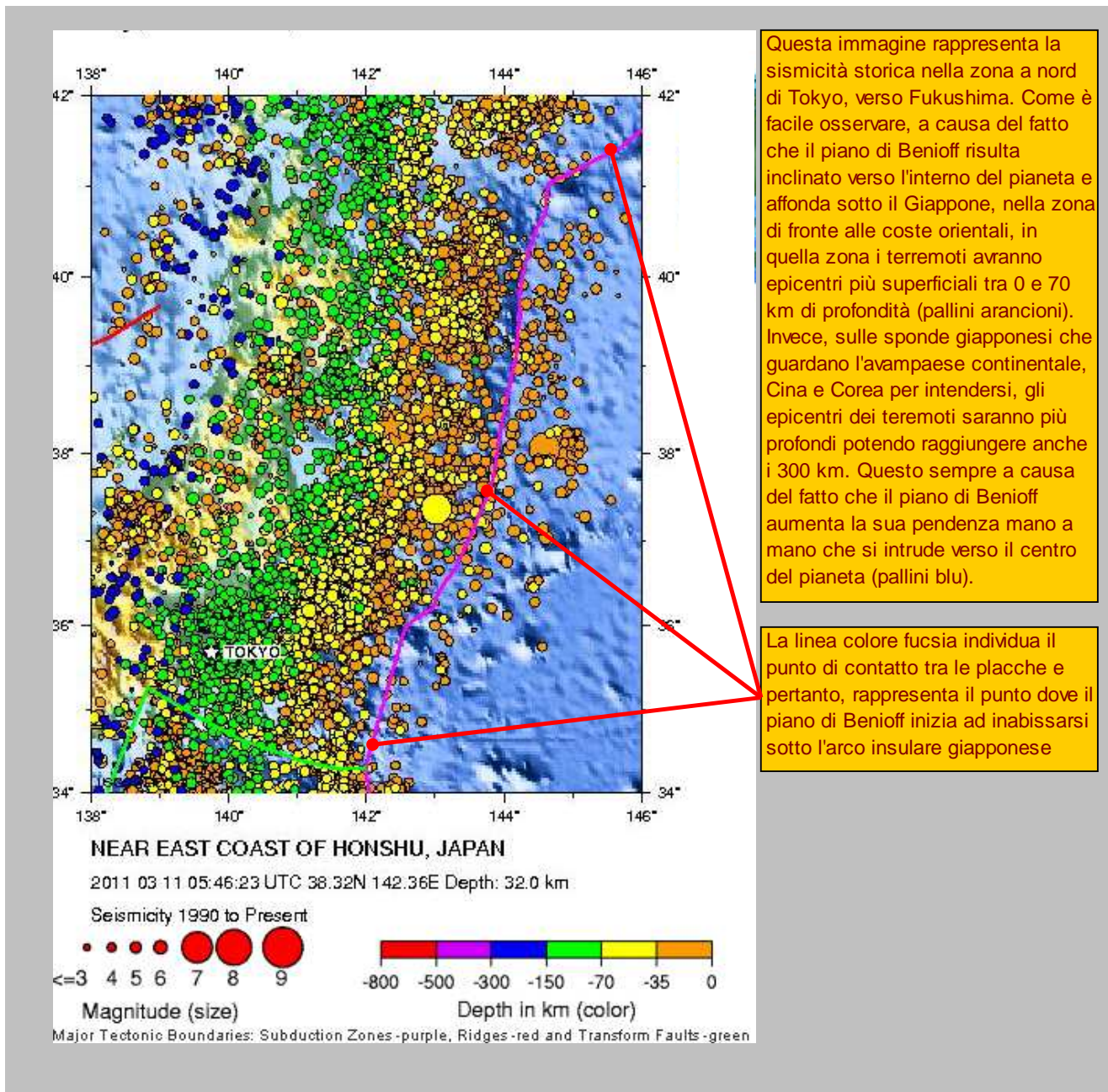


Figura 11 – Andamento della sismologia storica in Giappone

Se osservate la scala graduata in colore, potrete constatare che gli epicentri dei terremoti sul versante orientale del Giappone (pallini colore giallo arancio), sono collocati a profondità minori rispetto a quelli che si originano di fronte alle coste occidentali del Giappone (pallini di colore blu). Tale situazione è assolutamente corretta, perché ad oriente dell'arcipelago giapponese si scontrano le zolle pacifica ed eurasiatica. Quindi proprio lì, ad oriente dell'arco insulare, a pochi chilometri dalle coste giapponesi, inizia ad inabissarsi nel mantello il piano di Benioff. Ma dove il piano di Benioff inizia ad inabissarsi i terremoti avranno epicentri superficiali, come correttamente individuato dalle misure rappresentate nella precedente figura dai pallini giallo-arancio. Mano a mano che il piano di Benioff si inabissa sotto l'arcipelago giapponese, gli epicentri dei terremoti risulteranno progressivamente sempre più

profondi, esattamente come misurato lungo le coste occidentali del Giappone (pallini blu della figura 11). Tutto questo è dovuto al fatto che il piano di Benioff affonda nel mantello terrestre con una pendenza la quale, inizialmente, è di circa 33 gradi e, successivamente, può raggiungere anche inclinazioni intorno ai 60 gradi. Ora i terremoti profondi producono piccole onde superficiali e quindi la loro Ms (Magnitudine superficiale) è inferiore, a parità d'energia liberata, rispetto a quella dei terremoti maggiormente superficiali. A fronte, però, di questa constatazione sperimentale ed anche logica, come abbiamo visto con le considerazioni legate al piano di Benioff, guardate nella figura 12, dove i giapponesi hanno collocato alcuni dei loro impianti nucleari. Hanno forse sbagliato qualcosa? O forse non conoscevano cosa accade quando una zolla subduce sotto un'altra? A voi eventuali commenti!



Figura 12 – Collocazione delle centrali nucleari in Giappone

Alcuni link interessanti sull'argomento:

<http://legacy.ingv.it/roma/attivita/geomagnetismo/fisicainterno/sismicita/sismicita.html>

<http://www.seismolab.caltech.edu/history.html>

<http://www.gorpaderno.it/Corsi/Corso%20terremoti/Rischio%20sismico.pdf>

- (1) Reologia: (fisica) scienza che studia le deformazioni della materia sotto l'azione di agenti esterni.
- (2) Subduzione: (geologia) con tale termine si vuole indicare lo scorrimento di una placca litosferica sotto un'altra.
- (3) Avampaese: (geologia) è un'area di superficie terrestre che risulta indisturbata da un processo di formazione montuosa (o orogenetica).