

PRINCIPI DI SCIENZE DELLA TERRA - LITOSFERA

TERRA

Prof. Giovanni Vezzoli
Università di Milano-Bicocca (DISAT)

September 12, 2024

La Terra

La Terra viene rappresentata (più o meno) come una sfera e suddivisa in strati concentrici

Possiamo quindi domandarci se è vero che la Terra è una sfera ma che soprattutto che è divisa in strati



La Terra

Già gli antichi greci conoscevano e/o immaginavano che la Terra fosse sferica.

Nel III secolo a.C. Eratostene di Cirene (città che si trova nell'odierna Libia) misurò la circonferenza della Terra attraverso il seguente esperimento.



La Terra



Esperimento di Eratostene

La Terra

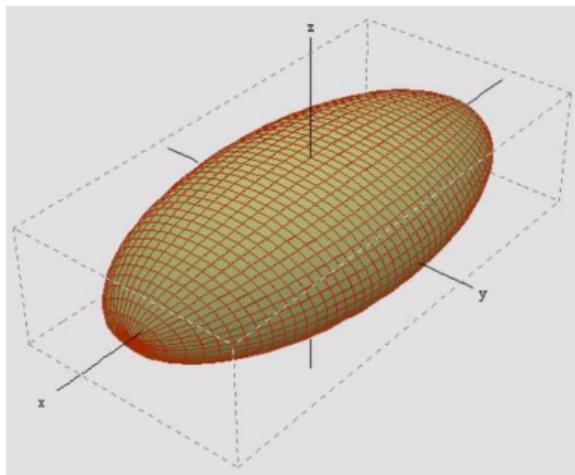
In realtà la Terra non è sferica.

A causa della forza centrifuga dovuta alla sua rotazione presenta un rigonfiamento lungo la fascia equatoriale (raggio equatoriale = 6378.2 km) e uno schiacciamento in corrispondenza delle regioni polari (raggio Polare = 6356.8 km) con una differenza di ~ 21 km

La Terra

Dal punto di vista geometrico la figura che meglio descrive il nostro pianeta è un **Ellissoide di rotazione** (sferoide oblato).

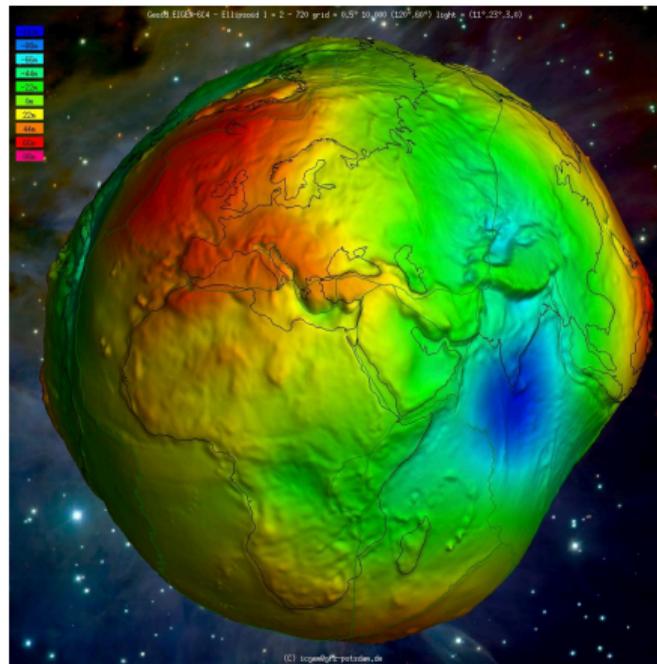
Si tratta di un solido regolare che si ottiene facendo ruotare un'ellisse attorno al suo asse minore. **L'ellissoide viene utilizzato per la creazione delle carte topografiche.**



La Terra

Ma il solido che meglio descrive la forma della Terra è il **GEOIDE**.

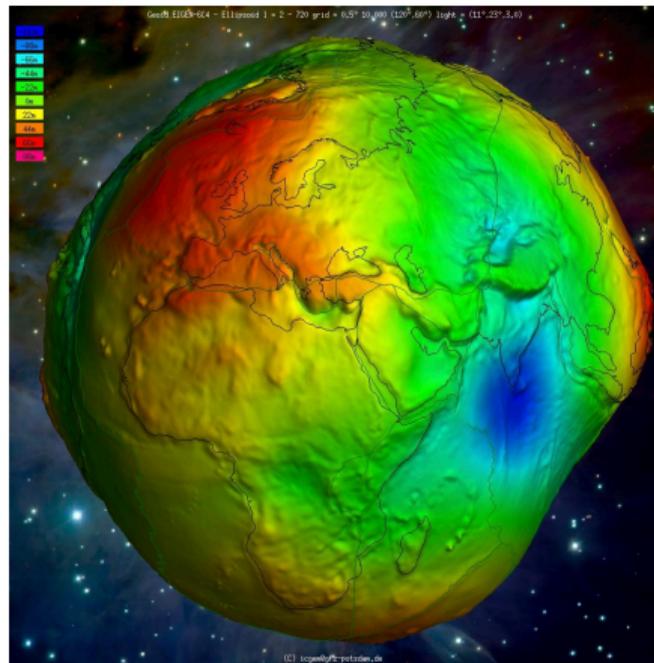
Si tratta di un solido ideale e irregolare (**con zone rilevate in rosso e depressioni in blu**) che ha una superficie sempre perpendicolare ad un filo a piombo (cioè alla direzione della forza di gravità).



La Terra

Questa forma irregolare dipende dalla variabilità e dalla distribuzione dei materiali (densità e tipi di rocce) che costituiscono la Terra

Si definiscono anomalie positive del geoide (in rosso - rilievi) e negative (in blu - depressioni) zone dove abbiamo rispettivamente eccessi e deficit di massa nell'interno della Terra.



La Terra

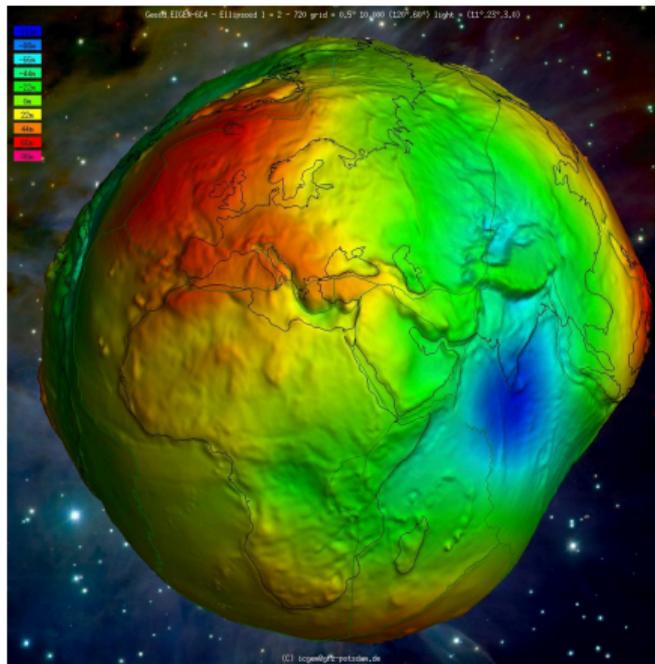
Prima però definiamo alcuni termini che useremo spesso:

- DENSITÀ (ρ): Rapporto tra la massa (m) e il volume (v)
- RIGIDITÀ (μ): In meccanica dei materiali, la rigidità è la capacità che ha un corpo di opporsi alla deformazione elastica provocata da una forza applicata. Il suo inverso è detto cedevolezza o flessibilità (proprietà della materia per cui una sostanza allo stato solido, sottoposta a deformazione, si rompe e non si piega). In GEOLOGIA: Proprietà di una roccia, allo stato cristallino, di opporsi alle sollecitazioni tendenti a modificarne la forma. Modulo di compressibilità (k) è l'aumento della densità provocato da una compressione. È definito come l'incremento di pressione necessario a causare un relativo incremento di densità.
- VISCOSITÀ: La viscosità di un fluido si dice bassa se si muove velocemente (acqua). D'altra parte, se un fluido si muove lentamente (p.es. miele) si dice che la sua viscosità è alta.

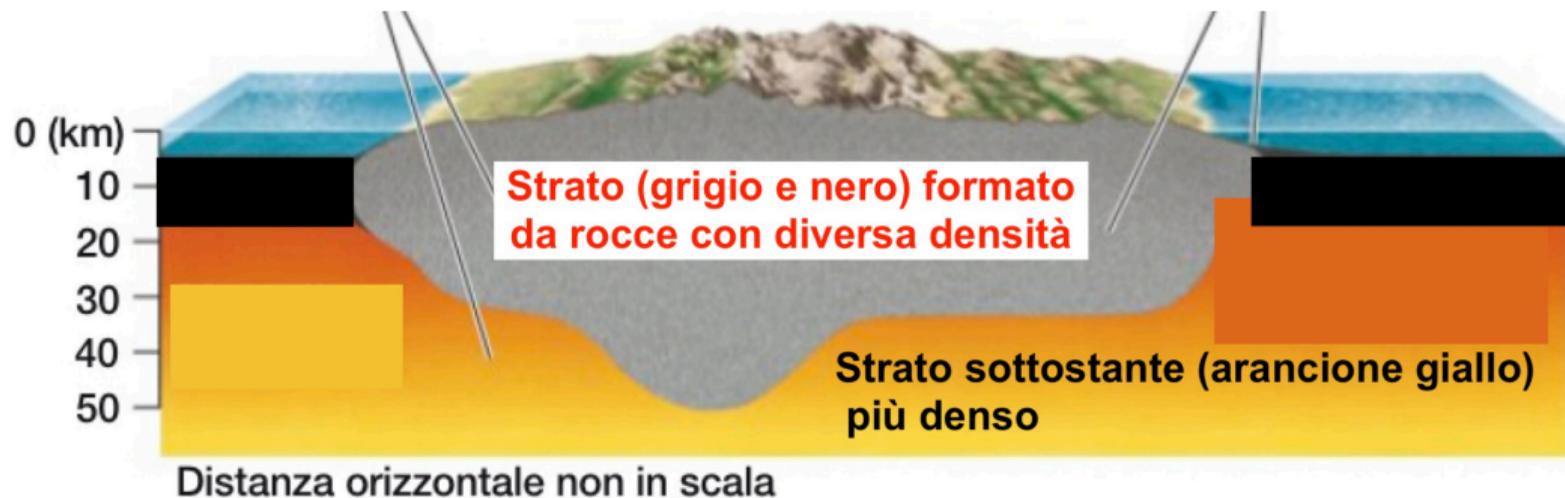
La Terra

Ma le anomalie come le spieghiamo?

Ipotesi Isostatica: Bisogna ipotizzare che esiste uno "strato" della Terra formato da rocce diverse e soprattutto con diversa **densità** che "galleggia" su uno strato sottostante più denso. Le zone con eccesso di massa all'interno della Terra (anomalie positive - zone rilevate in superficie come le montagne) sono formate da rocce di minore densità, e, inversamente, le zone con deficit di massa in superficie nelle zone oceaniche sono formate invece da rocce più dense



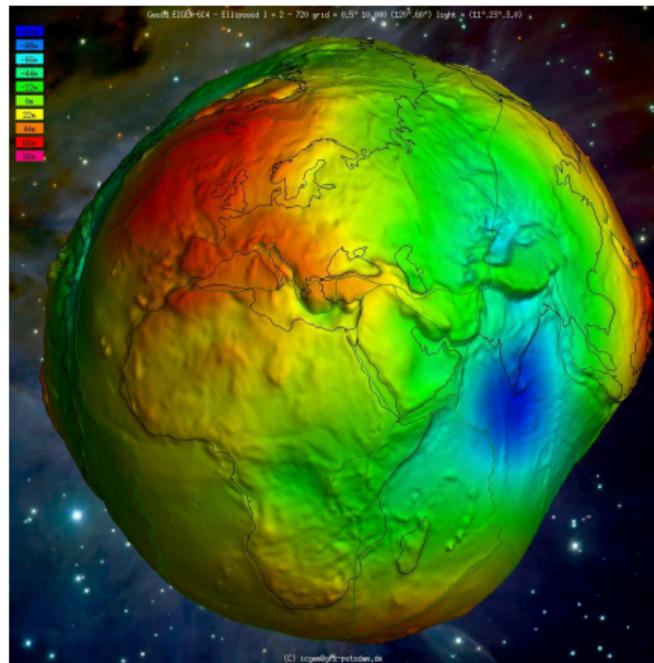
La Terra



Ipotesi Isostatica: Strato grigio e nero formato da rocce diverse e diversa densità (grigio meno denso; nero più denso) galleggianti su un substrato (arancione-giallo) più denso

La Terra

Per la forma della Terra potete consultare:
[International Centre for Global Earth Models \(ICGEM\)](#)



La Terra

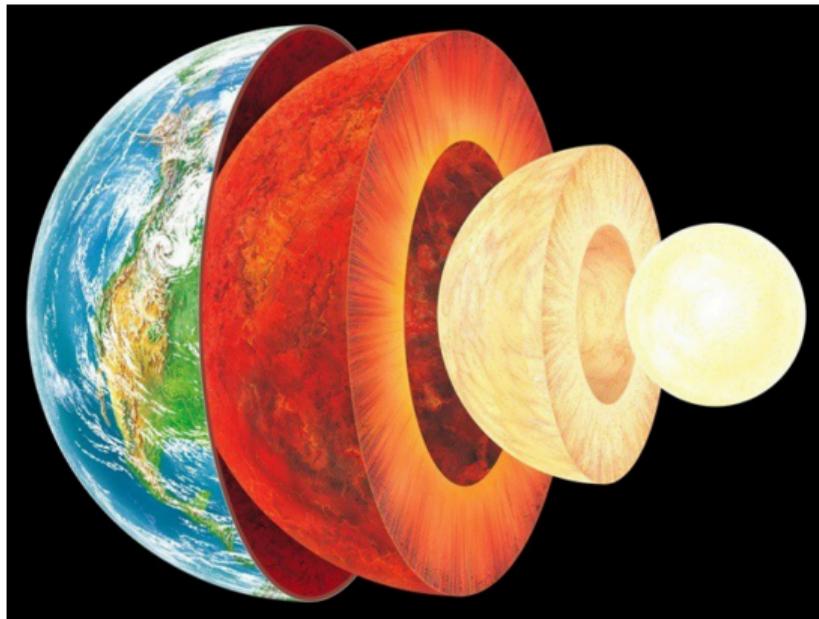
Mentre per tutte o quasi le misure della Terra potete consultare: [Earth Fact Sheet](#)



La Terra

Vista la forma della Terra e le anomalie del GEOIDE adesso cerchiamo di rispondere alle seguenti domande:

- **Come sono stati riconosciuti gli strati più o meno densi?**
- **Ma soprattutto, quanti strati ci sono?**



La Terra

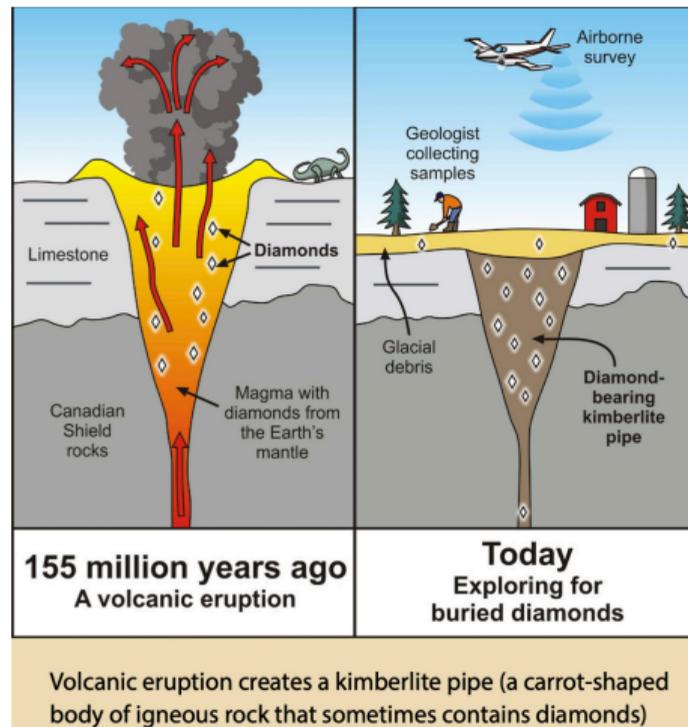
Punto principale è che noi, **direttamente**, non conosciamo praticamente niente di quello che esiste sotto i nostri piedi....



Figure 2: Pozzo superprofondo di Kola

La Terra

Le poche informazioni dirette di come è fatto l'interno della Terra le possiamo avere studiando i frammenti di roccia chiamati *xenoliti* (dal greco ksénos, estraneo + lithos, pietra) provenienti da profondità di qualche centinaio di km attraverso eruzioni vulcaniche (**camini kimberlitici**).



La Terra

Le rocce estratte dai camini Kimberlitici contengono (quasi sempre) diamanti

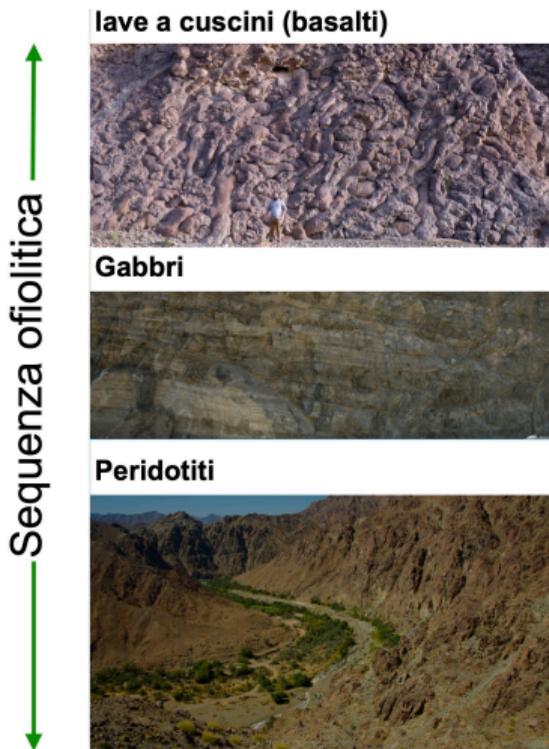


In che modo i diamanti risalgono in superficie?

La Terra

Oppure studiando le sequenze **ofiolitiche** (*ofioliti* dal greco serpente e roccia).

Si tratta di unità rocciose sovrapposte una sopra l'altra provenienti da qualche km in profondità e che determinati processi geologici hanno portato in superficie



La Terra

Le sequenze ofiolitiche si trovano da noi in Mediterraneo oppure in Oman sul Mar Arabico.

Semail - Oman



Trodos - Cipro



La Terra

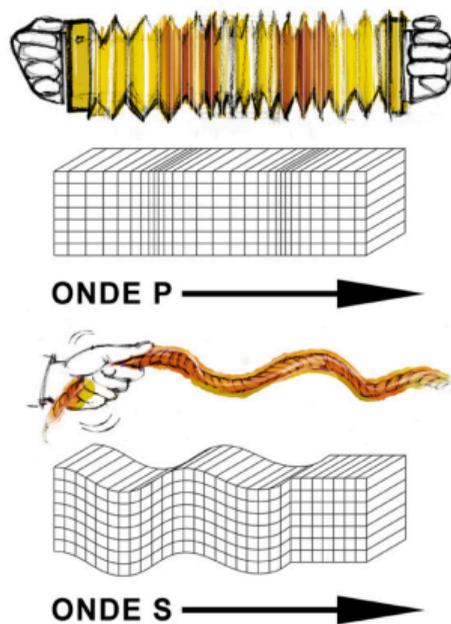
Quindi per conoscere come è fatto l'interno della Terra dobbiamo ricorrere a **metodi indiretti**

Le onde sismiche

La Terra

- **Onde P** (primarie). Sono le onde sismiche più veloci e fanno vibrare il suolo nella stessa direzione in cui si propagano; Al loro passaggio, le rocce si comprimono e si dilatano continuamente (tipo fisarmonica)
- **Onde S** (secondarie) viaggiano più lentamente delle onde P ($V_s \sim V_p/1.7$) e fanno vibrare le rocce perpendicolarmente rispetto alla loro direzione di movimento (p. es. una corda che viene scossa).

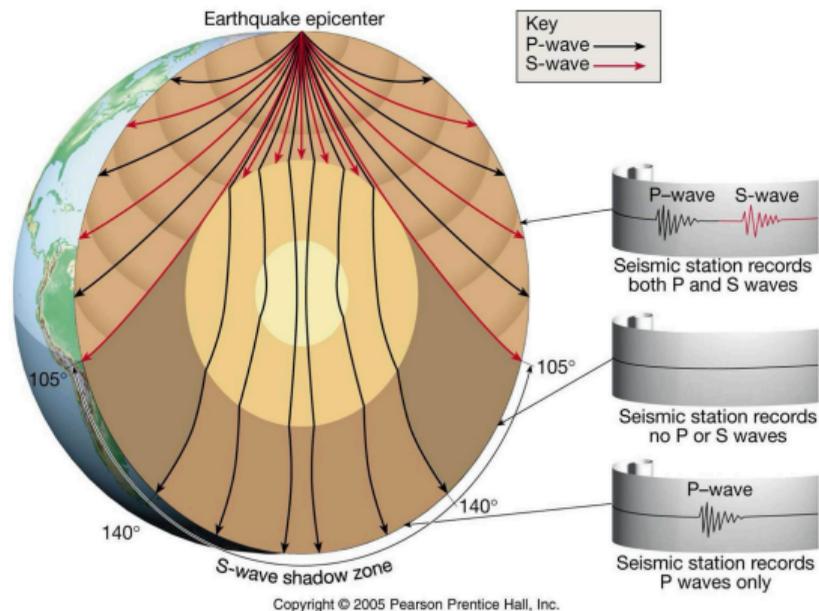
Le onde sismiche si dividono in:



Ma perché usare le onde sismiche?

La Terra

Perché quando avviene un terremoto in profondità le rocce si fratturano e l'energia accumulata in anni o secoli viene quasi istantaneamente liberata sotto forma di onde sismiche P e S che si propagano all'interno della Terra.



La Terra

Inoltre, le onde sismiche attraversano la Terra variando la velocità e anche la loro direzione a seconda delle proprietà (densità e rigidità) delle rocce o del materiale attraversato

$$V_p = \sqrt{\frac{k + 3/4\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Poiché i liquidi hanno rigidità nulla, **le onde S NON si propagano nei fluidi**.
Le onde P invece continuano a propagarsi anche nei fluidi perché al numeratore del rapporto che le definisce troviamo la compressibilità (k) del mezzo.

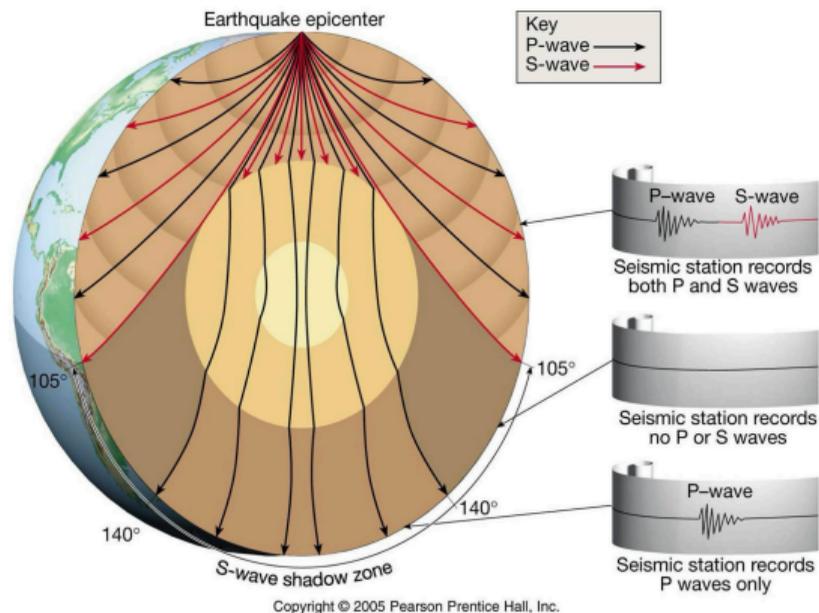
La Terra

Immagiamo un terremoto al Polo Nord (naturale o artificiale):

Le onde P scompaiono a $\sim 100^\circ$ dall'epicentro di un terremoto e riappaiono a $\sim 140^\circ$ per l'effetto della diffrazione (zona d'ombra delle onde P)

Le onde S scompaiono a $\sim 100^\circ$ dalla zona epicentro di un terremoto **e non riappaiono più** (zona d'ombra delle onde S)

→ **QUINDI?**



La Terra

La studiosa danese Inge Lehmann fu tra le prime scienziate che, osservando l'andamento delle onde sismiche, ipotizzò che nel centro della Terra doveva esistere un nucleo diviso in una parte esterna **liquida** e una parte interna **solida**.

Si pensa che il nucleo interno solido si sia formato ~2 miliardi di anni fa. Da allora è in continua espansione per la sedimentazione gravitativa alla sua sommità di ferro segregato dal nucleo liquido in raffreddamento.

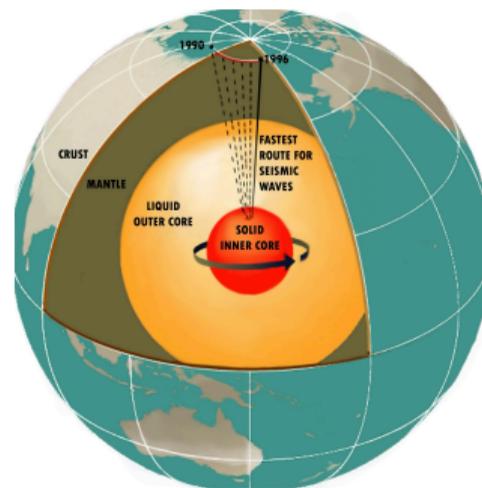
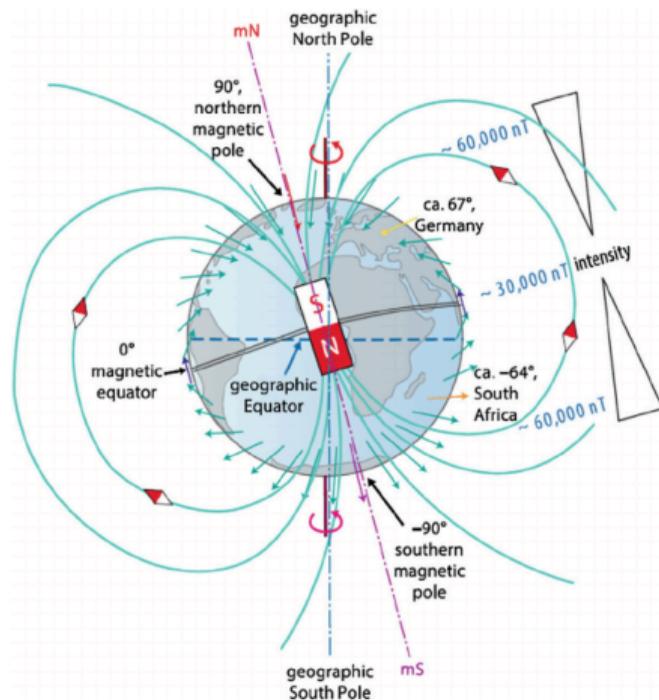


Figure 3: Inge Lehmann Geofisico, Danimarca (1888-1993)

La Terra

L'interazione tra queste due parti (formate da Fe-Ni) genera il campo magnetico della Terra.

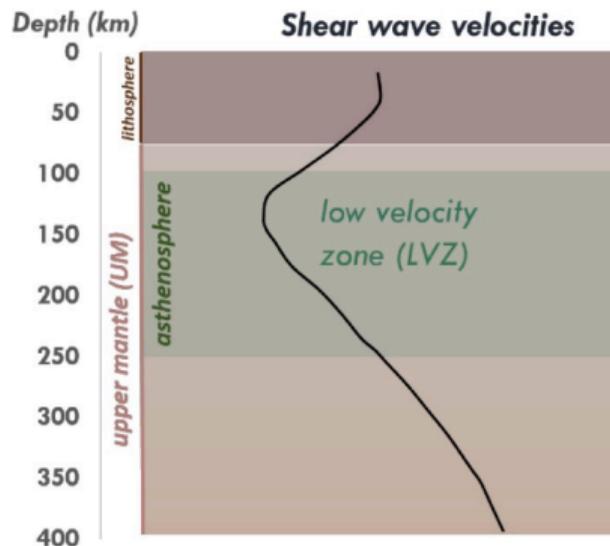
Il nostro campo magnetico viene assimilato ad un campo magnetico generato da un dipolo magnetico con i poli magnetici **non** coincidenti con quelli geografici (asse inclinato di 11° rispetto all'asse di rotazione terrestre).



La Terra

Studiando sempre l'andamento delle onde sismiche ci si è accorti poi che esiste una regione abbastanza superficiale della Terra, dai ~ 100 km di profondità ~ 400 km, dove le onde sismiche rallentano.

Questa zona è chiamata canale a bassa velocità (Low Velocity Zone, LVZ)



La Terra

Insieme allo studio sull'andamento delle onde sismiche si è poi utilizzato:

L'ipotesi astronomica di formazione della Terra e la distribuzione del calore terrestre

La Terra

La Terra si è formata in seguito all'aggregazione di piccoli corpi celesti (*planetesimi*) che scontrandosi tra loro si fondevano e **permettevano successivamente agli elementi più densi (come il ferro e il nichel) di "sprofondare" verso l'interno del pianeta.**

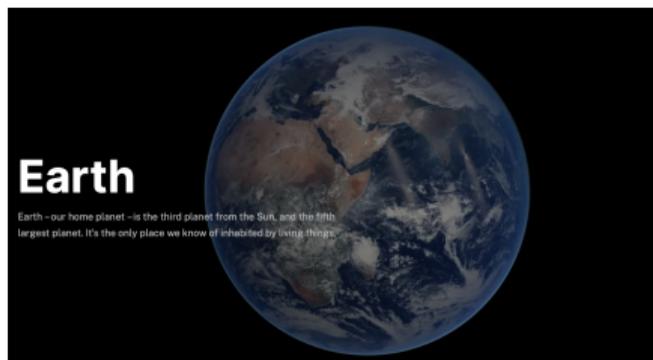
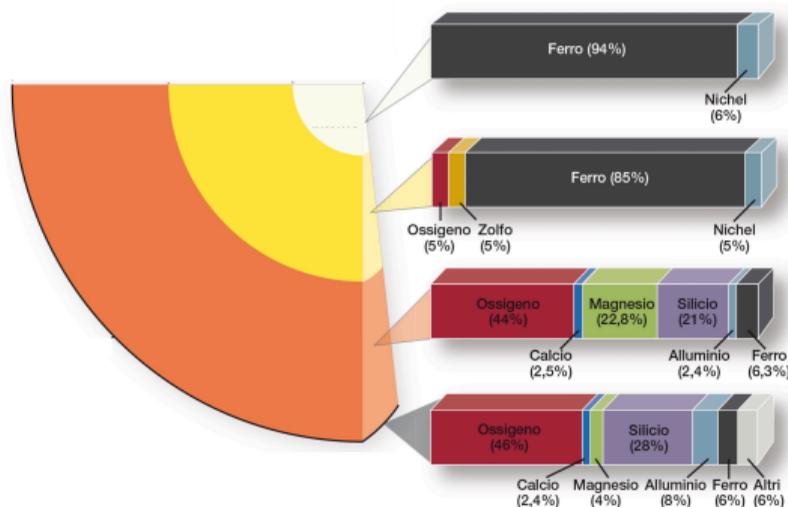


Figure 4: EARTH

La Terra

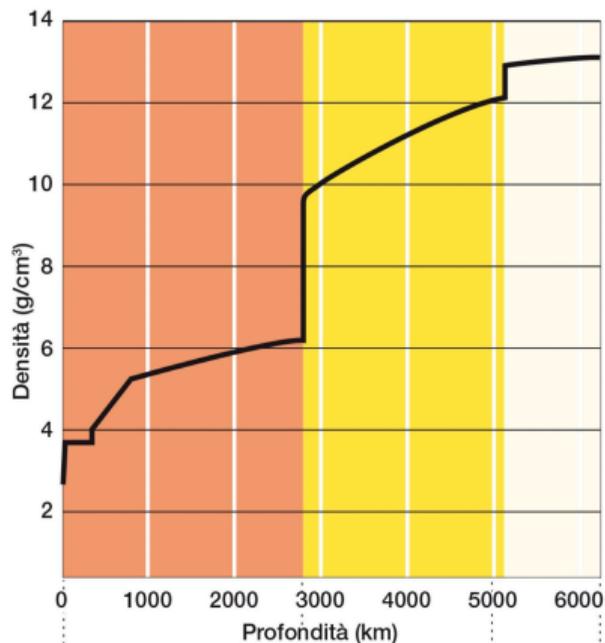
Distribuzione degli elementi dal centro della Terra alla sua superficie



Dal punto di vista compositivo, le rocce e/o i materiali che formano i livelli più profondi saranno più ricchi di Ferro e Magnesio delle rocce che invece provengono dai livelli più superficiali (più ricche di Ossigeno, Silicio, Alluminio).

La Terra

Ma questa differenza di composizione si riflette sulla densità delle rocce e dei materiali che li contengono



Le rocce e/o i materiali che formano i livelli più profondi saranno più **densi** di quelle che invece provengono dai livelli più superficiali

La Terra

Il calore terrestre

Dal momento della sua formazione la Terra sta subendo un costante e lento raffreddamento.

Il calore emesso dal pianeta è in parte una conseguenza del processo di raffreddamento iniziato dopo la sua formazione.

La produzione di tale calore è infatti da attribuire, per circa il 20 - 40%, alla collisione delle particelle o dei planetesimi che hanno formato la Terra e al calore di frizione legato ai movimenti interni.

Il rimanente 80 - 60% del calore emesso è da attribuire al decadimento radioattivo degli elementi che compongono il nostro pianeta, in particolare gli isotopi dell'uranio, del torio e del potassio.

La Terra

Gli isotopi di uno stesso elemento hanno lo stesso numero di protoni (e quindi di elettroni) ma un diverso numero di neutroni

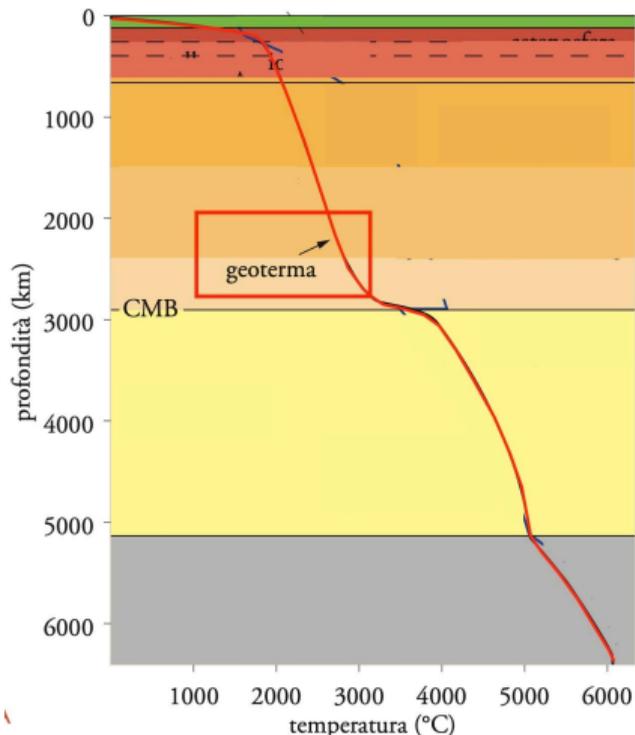
Quindi hanno lo stesso numero atomico (detto anche numero protonico, o numero di protoni) ma un diverso numero di massa (protoni + neutroni)

La Terra

Il flusso termico terrestre, definito come la quantità di calore emessa nell'unità di tempo per ogni unità di superficie è $\sim 0.06 \text{ W/m}^2$
(il flusso di energia solare è $\sim 1000 \text{ W/m}^2$).

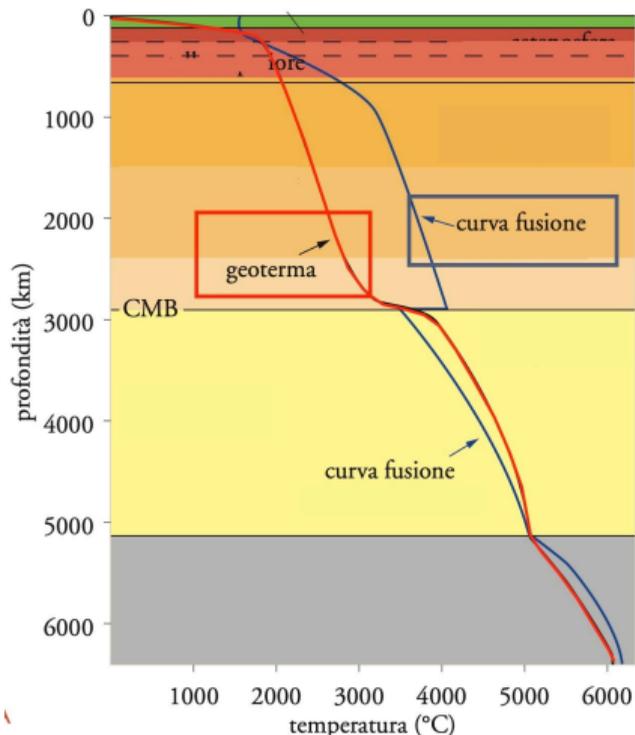
Tuttavia, dal punto di vista energetico il flusso termico è il più imponente tra i fenomeni terrestri, poiché la quantità di energia liberata per tale via in un anno è ~ 50 volte maggiore dell'energia liberata da tutti i terremoti e le eruzioni vulcaniche nello stesso periodo di tempo

La Terra



Geoterma. Curva che descrive come varia la temperatura della Terra con la profondità

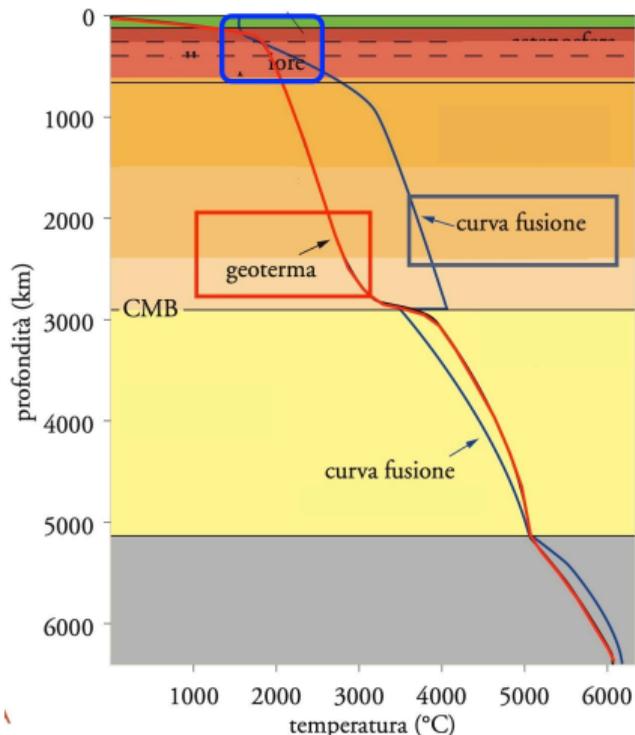
La Terra



Insieme alla Geoterma è stata poi costruita la **curva di fusione** delle rocce e dei materiali di cui è formata la Terra

Osservate l'andamento della curva della geoterma e di quella della curva della temperatura di fusione delle rocce e dei materiali terrestri soprattutto nella parte del nucleo esterno (livello giallo).

La Terra



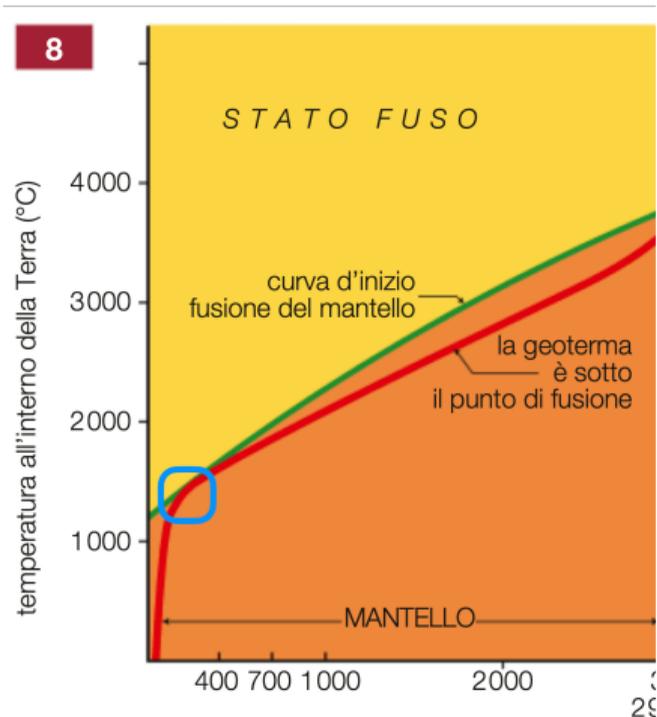
Se però osserviamo bene le due curve ci accorgiamo che esiste un'altra parte dove la curva della Geoterma e quella di fusione si intercettano o sono molto vicine (riquadro blu)

La Terra

Questo è il motivo dell'esistenza del "canale a bassa velocità" delle onde sismiche visto in precedenza.

La minore velocità delle onde sismiche è dovuta al fatto che in quell'intervallo di profondità (100-400 km) la curva di fusione è prossima o intercetta la Geoterma ($T \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$; riquadro blu).

All'intercetta tra le due curve si pensa si formi $\sim 1\div 2\%$ di roccia fusa, che diminuisce fortemente la rigidità e la viscosità di quella porzione di Mantello e di conseguenza anche la velocità delle onde sismiche.



La Terra

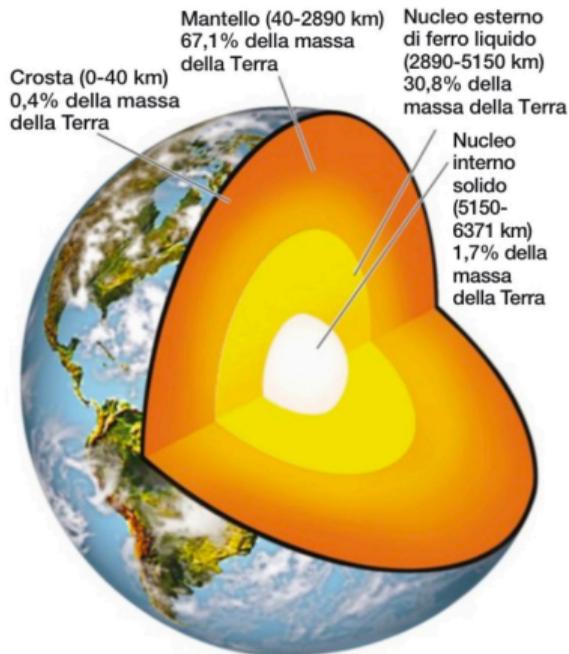
A questo punto, usando tutte le informazioni indirette e le poche informazioni dirette gli scienziati ipotizzano che la Terra possa essere suddivisa in parti differenti considerando 2 criteri:

1. **La composizione** delle rocce e dei materiali che la compongono
2. **Il comportamento fisico/meccanico** (p.es. movimento relativo) di alcune parti rispetto ad altre

La Terra

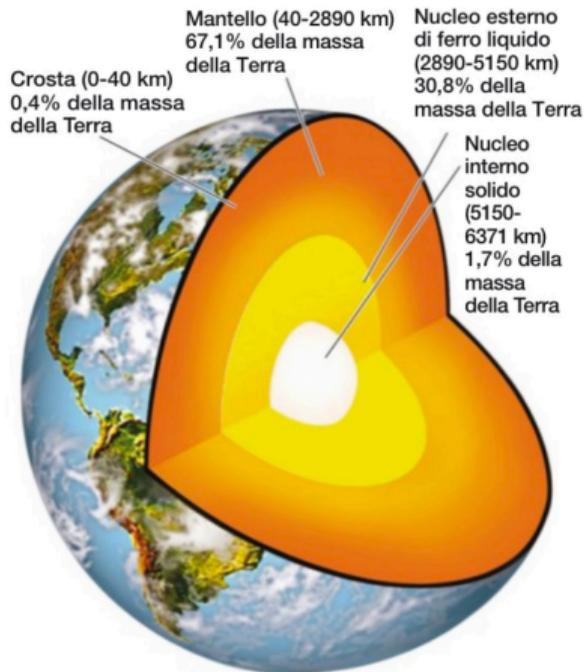
1. Suddivisione della Terra dal punto di vista della composizione

La Terra



- **Crosta continentale e oceanica (solida - rocce)**
- **Mantello (solido - rocce)**
- **Nucleo esterno (liquido - leghe di Fe-Ni)**
- **Nucleo interno (solido - leghe di Fe-Ni)**

La Terra



Crosta Continentale (30-40 km) - "sialica ; granitica"
($\rho \sim 2.7g/cm^3$)

Crosta Oceanica (5-10 km) - "femica; basaltica"
($\rho \sim 3.0g/cm^3$)

Discontinuità di Mohorovičić (MOHO)

Mantello ($\rho \sim 3.0 - 6.0g/cm^3$). Superiore 670 km e Inferiore 2885 km. Rocce Femiche.

Discontinuità di Gutenberg

Nucleo Esterno - Discontinuità di Lehmann - Interno
($\rho \sim 10.0 - 13.0g/cm^3$). Leghe Fe - Ni.