

▲ Gigantesca miniera di diamanti a cielo aperto situata a Mirny, nella Siberia orientale.

1 L'INTERNO DELLA TERRA



EDUCAZIONE CIVICA Dalla kimberlite al commercio etico dei diamanti

Come in *Viaggio al centro della Terra* di Jules Verne sarebbe bello poter scendere nelle viscere della Terra calandosi dal cratere di un vulcano. Anche se tale privilegio è riservato ai personaggi dei romanzi, è proprio tramite lo studio delle rocce che si trovano nei camini vulcanici che possiamo ottenere le testimonianze dirette sui materiali che si trovano all'interno della Terra.

Un prezioso strumento per i geologi sono le kimberliti – dalla città di Kimberley in Sudafrica, dove sono state inizialmente individuate – rocce magmatiche effusive che contengono frammenti dell'interno della Terra strappati dal magma a oltre 200 km di profondità e trasportati attraverso la crosta fino alla superficie.

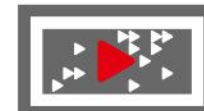
Nelle kimberliti si trovano i diamanti, minerali che si possono formare soltanto in particolari condizioni di temperatura e di pressione come quelle riscontrabili a tali profondità.

L'interesse per i diamanti non riguarda solo i geologi; per il loro elevatissimo valore economico sono stati spesso coinvolti in attività criminali e la loro vendita è servita persino a finanziare guerre. Inoltre, bisogna considerare che la loro estrazione può causare danni permanenti all'ambiente e molto spesso si basa sullo sfruttamento dei lavoratori coinvolti. Il termine «blood diamonds» è stato coniato proprio per indicare le gemme estratte in zone di guerra, spesso sfruttando lavoratori costretti a vivere in condizioni disumane. Nel 2003 a Kimberley – per volontà dei governi, dell'industria internazionale dei diamanti e della società civile – è nato il *Kimberley Process* (KP), un accordo commerciale finalizzato a prevenire il flusso illegale di diamanti provenienti da zone di guerra. Attualmente il 98,8% della produzione mondiale di diamanti grezzi è certificata «conflict free» dal Kimberley Process, al quale aderiscono 82 Paesi, tra cui tutti i membri dell'Unione europea.

▼ I Paesi maggiori produttori di diamanti.



GUARDA!



Ora tocca a te



1

Indagini dirette e indirette

È sufficiente osservare il cielo in una notte stellata per vedere oggetti che si trovano a distanze immense da noi, misurate in termini di anni luce. La trasparenza dell'atmosfera e dello spazio interstellare ci permettono di indagare, a partire dall'invenzione del cannocchiale e poi con strumenti sempre più sofisticati, lo spazio profondo. Se invece rivolgiamo lo sguardo verso il basso le cose si complicano. I materiali solidi della Terra non si prestano all'indagine diretta attraverso i nostri sensi perché sono opachi. Questa condizione ha portato a un forte ritardo e a un'estrema difficoltà nell'acquisire conoscenze sulle caratteristiche interne della Terra solida.

I metodi di indagine che permettono di studiare l'interno della Terra sono stati scelti in funzione delle caratteristiche che ci interessa conoscere. Queste comprendono la sua *composizione*, in termini di elementi chimici, minerali e rocce, la distribuzione di *parametri fisici*, quali la temperatura e la pressione, la presenza e distribuzione di *discontinuità* che permettano di suddividerla in zone diverse e la sua *dinamicità*, ovvero le modalità con cui i precedenti caratteri variano nel tempo. Possiamo distinguere tra metodi di indagine diretti e indiretti.

I metodi di indagine diretti

I **metodi di indagine diretti** prevedono di effettuare misure direttamente all'interno della Terra e di studiare campioni dei materiali provenienti dal suo interno. Queste metodologie sono purtroppo soggette a forti limitazioni.

Le **gallerie** più profonde accessibili ai ricercatori sono quelle minerarie e raggiungono profondità fino a circa 4 km ► **Figura 1**. Per arrivare a profondità superiori si utilizzano i **sondaggi**, che consentono di recuperare campioni cilindrici di piccole dimensioni e di effettuare misure dirette nel foro del sondaggio. I sondaggi più profondi sono in genere quelli eseguiti per la ricerca e lo sfruttamento di giacimenti petroliferi e arrivano a circa 6-7 km di profondità. Il sondaggio più profondo mai eseguito è il Kola Superdeep Borehole, perforato nel secolo scorso, tra il 1970 e il 1989, nella penisola di Kola, in Russia, per motivi scientifici. Esso ha raggiunto una profondità massima di circa 12 km prima di essere interrotto per

i costi elevati e poi definitivamente chiuso nel 2012.

In definitiva, l'accesso diretto all'interno della Terra è limitato a una profondità pari a circa lo 0,06% del suo raggio attraverso gallerie e allo 0,18% attraverso sondaggi. E questo, a causa dei costi molto elevati, solo in pochissimi punti della Terra.

La dinamica terrestre ci permette di eseguire indagini dirette anche su campioni che non sono stati portati in superficie artificialmente, ma dai **movimenti tettonici** e dalle **eruzioni vulcaniche**. Oggi si ritiene che i campioni più profondi giunti in superficie in questo modo provengano da circa 200 km di profondità. Queste indagini sono estremamente utili perché sono le uniche che ci consentono di studiare direttamente i materiali interni della Terra oltre i 12 km di profondità. In questo modo si raggiungono comunque profondità pari a non più del 3% del raggio terrestre. Queste indagini soffrono inoltre di una forte limitazione. Se infatti il rapido recupero di campioni dalle gallerie e dai sondaggi assicura che questi non subiscano modificazioni durante la risalita, lo stesso non avviene per le rocce portate in superficie da processi naturali.

Le forze tettoniche possono infatti impiegare milioni di anni per trasportare le rocce da profondità di decine di chilometri alla superficie e durante questo lasso di tempo esse possono modificarsi, adeguandosi, del tutto o in parte, alle nuove condizioni di pressione e temperatura a cui si vengono a trovare durante questo lento spostamento.

▼ Figura 1

Minatori nella miniera d'oro di Mponeng (Sudafrica), che, con i suoi 3900 m sotto la superficie, è la più profonda del mondo.



Sarà la competenza del geologo a permettere di riconoscere i caratteri della roccia che non sono stati modificati durante la lenta risalita e che consentono di dedurre le caratteristiche che possedeva in profondità. Solo in rari casi, alcune eruzioni vulcaniche consentono il trasporto in superficie di campioni di roccia da grandi profondità in tempi molto brevi, in genere alcune ore. Si tratta di campioni preziosi, di solito ritrovati come corpi estranei, detti **xenoliti**, all'interno di rocce magmatiche [► Figura 2].

■ I metodi di indagine indiretti

Le **indagini indirette** costituiscono l'unica metodologia in grado di fornire indizi sulle caratteristiche profonde della Terra, oltre quel 3% del suo raggio investigabile con i metodi diretti. I principali metodi indiretti rientrano nel campo di una disciplina, la **geofisica**, che utilizza metodologie che si rifanno alla fisica per indagare il nostro pianeta.

I metodi geofisici principali, che vedremo nei paragrafi successivi, comprendono:

- **geodesia**, che studia la forma della Terra;
- **termometria**, che studia la distribuzione delle temperature all'interno della Terra;

- **sismologia**, che studia la propagazione delle onde sismiche all'interno della Terra;
- **magnetometria**, che studia la configurazione del campo magnetico terrestre.

Ai metodi geofisici si affiancano anche altre due metodologie importanti. La prima è lo studio dei **meteoriti**. Alcuni di essi si pensa rappresentino il materiale solido primigenio del Sistema solare [► Figura 3]. Altri invece sono frammenti di porzioni interne di pianeti e planetesimi (piccole aggregazioni di masse da cui si sarebbero formati i pianeti solari), che permettono di fare analogie con l'interno della Terra.

Tra i metodi di indagine indiretti non geofisici è fondamentale la **petrologia sperimentale**, una disciplina relativamente recente, che si occupa di riprodurre in laboratorio i minerali e le rocce presenti nelle profondità della Terra. Essa fa uso di macchinari complessi e molto costosi che permettono di applicare a piccole quantità di materiali, scelti in base a ipotesi sulla composizione chimica dell'interno della Terra, temperature e pressioni analoghe a quelle presenti a elevate profondità, che con i macchinari più moderni possono arrivare a oltre 2000 °C e 100 gigapascal [► Figura 4]. In questo modo vengono innescati i processi che riproducono la formazione di minerali e rocce all'interno della Terra.

▼ **Figura 4**

Il multi-anvil del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Milano è un'apparecchiatura in grado di eseguire esperimenti di petrologia a condizioni di temperatura e pressione pari a quelle dell'interno della Terra fino a oltre 1000 km di profondità.



▲ **Figura 2**

Frammento di lava basaltica, contenente uno xenolite di roccia strappato a profondità di diverse decine di chilometri e portato in superficie insieme al magma.



▲ **Figura 3**

Un frammento delle dimensioni di circa 10 cm del meteorite Allende, caduto in Messico nel 1969: è costituito da materiale solido primigenio aggregatosi nei primi stadi di formazione del Sistema solare.



PRIMA DI PROSEGUIRE

1. Quali caratteristiche dell'interno della Terra interessa conoscere?
2. Quali sono i metodi di indagine diretta e a quale profondità massima possono arrivare?
3. Quali problematiche si riscontrano nello studio di campioni di roccia provenienti dall'interno della Terra attraverso i movimenti tettonici?
4. Quali sono i metodi di indagine indiretta e a quale profondità massima possono arrivare?
5. **RACCOGLIERE DATI** Cerca in Internet almeno due immagini rappresentative di luoghi dove è possibile ricavare informazioni sull'interno della Terra attraverso tecniche di indagine diretta. Poi prepara una breve relazione che riporti le principali informazioni geografiche su questi due luoghi, la profondità massima raggiunta, la loro funzione e quali tipi di informazioni ti aspetti si possano ricavare.



2

Indagini geodetiche e termiche

Le prime informazioni indirette sull'interno della Terra sono state fornite, già da lungo tempo, dalla geodesia e dalla termometria. L'affinamento delle tecniche di indagine in entrambi questi campi ha permesso in seguito di migliorare la qualità delle informazioni.

■ Indagini geodetiche

Le indagini geodetiche sono certamente tra le più antiche nell'ambito delle scienze della Terra e risalgono alle prime speculazioni sulla forma e le dimensioni del nostro pianeta.

La **geodesia** è la disciplina scientifica che studia la forma della Terra e il suo campo gravitazionale.

Lo studio dettagliato della forma della Terra inizia nel XVII secolo con le misure geodetiche fondate sul metodo geometrico della *triangolazione goniometrica*. Si definì così in modo accurato la misura dei meridiani e dei paralleli, giungendo a elaborare il modello dell'*ellissoide*, il solido che si ottiene ruotando un'ellisse sul proprio asse minore. Nella seconda metà del XIX secolo si capì che la forma della Terra è ancora più complessa, arrivando alla definizione di *geoide* come modello del pianeta.

Dopo la determinazione della forma e delle dimensioni della Terra, il successivo importante passo avanti nelle conoscenze geodetiche è legato alla formulazione da parte di Newton, nel XVII secolo, della *legge della gravitazione universale*:

$$F = G_0 \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Essa consente di calcolare la massa della Terra, e, a partire da questa, conoscendone il volume, la densità media dei materiali che la costituiscono. Vediamo in che modo.

A partire dalla misura del valore della costante gravitazionale G e del raggio terrestre si può stimare la **massa della Terra**, pari a $5,97 \times 10^{24}$ kg.

Il **volume della Terra** può essere calcolato con la formula del raggio della sfera a partire dal valore del suo raggio medio e risulta pari a $1,08 \times 10^{21}$ m³.

La **densità media dei materiali** che costituiscono la Terra sarà quindi data dal rapporto tra massa e volume ($d = m/V$) e risulta pari a $5,51 \times 10^3$ kg/m³,

equivalenti, per usare l'unità di misura più frequentemente utilizzata in scienze della Terra, a 5,51 g/cm³.

Il dato sulla densità media della Terra è di importanza fondamentale, soprattutto se confrontato con la densità delle rocce che affiorano sulla superficie terrestre, che risulta in media di circa 2,7 g/cm³. Ciò significa che la densità deve necessariamente aumentare all'interno della Terra, dove devono esistere materiali diversi dai minerali e dalle rocce che conosciamo attraverso le indagini dirette.

La misura dell'accelerazione di gravità g sulla superficie terrestre e nello spazio permette invece di costruire mappe dettagliate del campo gravitazionale del nostro pianeta [► **Figura 5**]. Questa misura fornisce anche informazioni preziose sulla densità dei diversi materiali che compongono la crosta terrestre e sulla distribuzione delle masse.

La disomogeneità del campo terrestre, e quindi la presenza di anomalie, è infatti attribuibile a una distribuzione di masse all'interno della Terra non perfettamente concentrica.

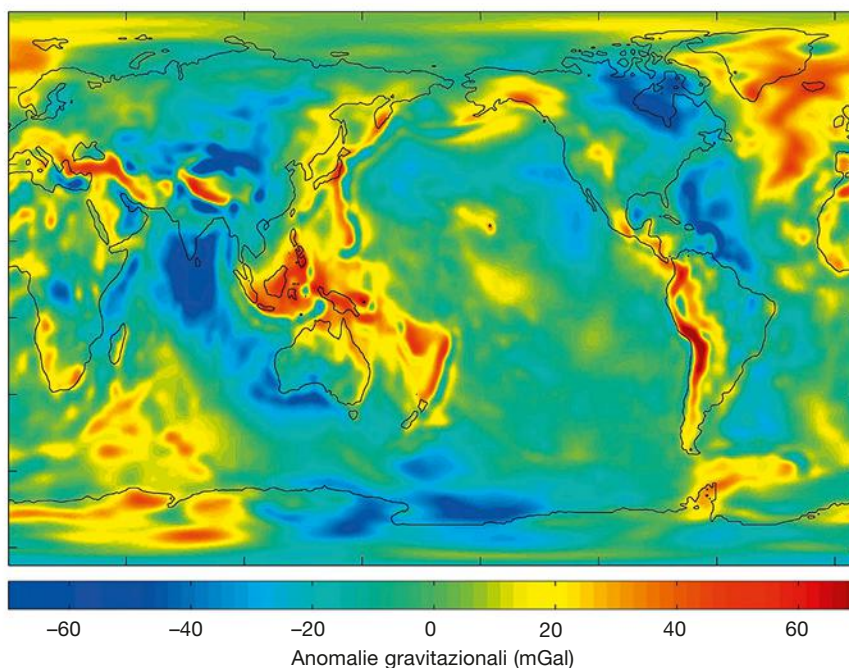
Un'altra informazione importante fornita dalla geodesia deriva dallo **schacciamento polare della Terra**. Esso indica che la Terra è in grado di deformarsi per effetto delle sollecitazioni impresse dal moto di rotazione. L'entità di questa deformazione

CAPIRE LE PAROLE

Geodesia deriva dal greco *geodaisia*, cioè l'arte di misurare e dividere i terreni (da *gé*, terra + il verbo *dáio*, dividere). Il greco *gé* ha dato luogo, in italiano, al prefisso geo-.

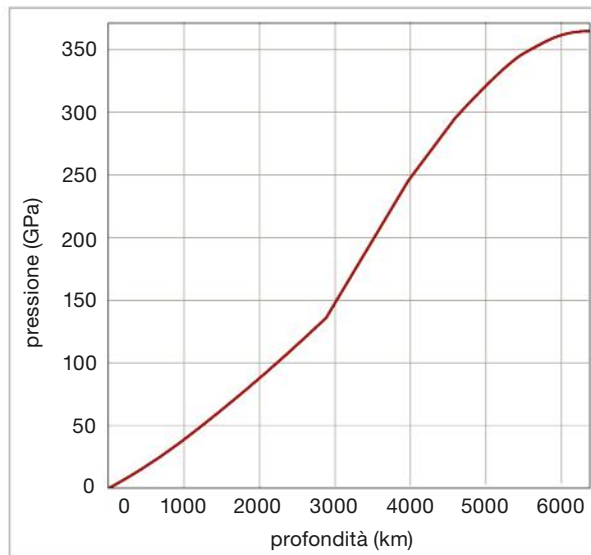
▼ Figura 5

Le anomalie gravitazionali sono riportate in falsi colori, tendenti al rosso per quelle positive e al blu per quelle negative. L'unità di misura è il mGal, cioè millesimo di Gal o galileo. 1 Gal corrisponde a un'accelerazione di 1 cm/s².



dà informazioni sulla resistenza offerta dai materiali presenti all'interno della Terra e in particolare sulla loro *viscosità*, cioè la loro resistenza allo scorrimento.

Un'ulteriore informazione fornita dalla geodesia riguarda l'aumento della pressione all'interno della Terra. Essa è dovuta al **carico litostatico**, cioè alla pressione generata in ogni punto all'interno della Terra dal peso delle rocce sovrastanti. I valori della densità media e del raggio terrestre danno una stima di massima dell'aumento di pressione [► **Figura 6**]. Stima che è però molto imprecisa, dato che l'andamento della pressione dipende da come la densità varia. Una sua conoscenza più accurata richiede perciò la costruzione di un modello che dia maggiori indicazioni sui materiali presenti e sulla loro densità.



◀ **Figura 6**
Andamento della pressione all'interno della Terra in funzione della profondità.

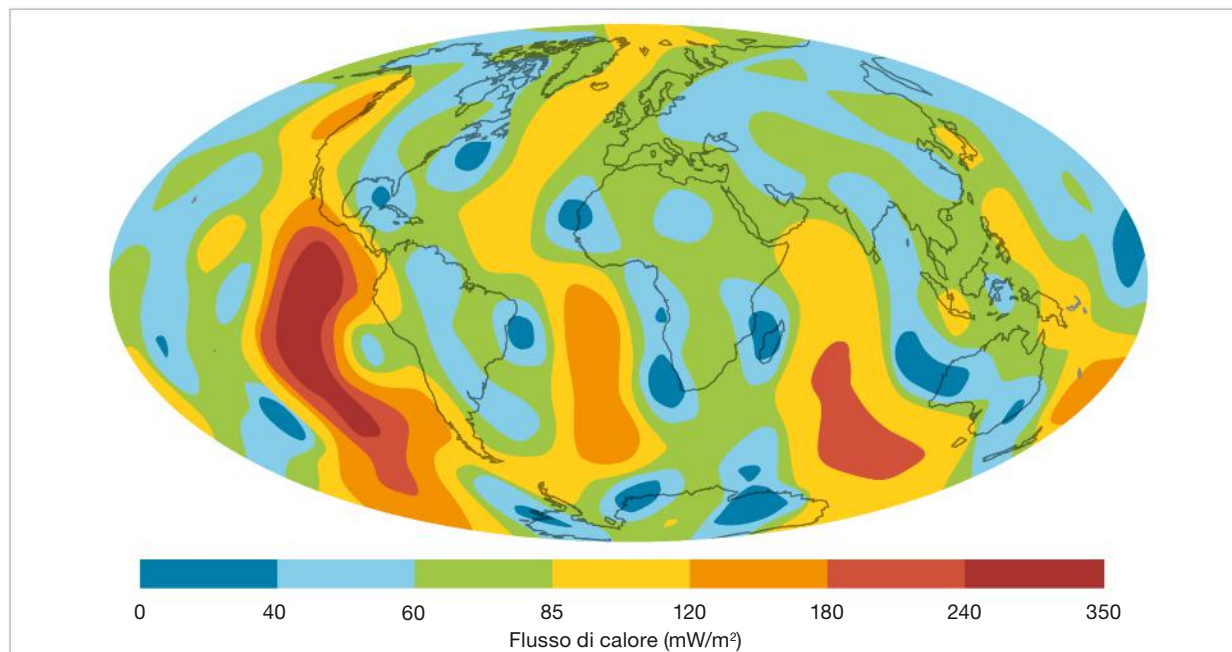
■ Indagini termiche

Le evidenze della presenza di temperature elevate all'interno della Terra sono numerose e note fin dall'antichità. L'attività vulcanica produce l'emissione in superficie di lave, ceneri e gas a temperature di centinaia di gradi centigradi, a volte anche superiori ai 1000 °C. Un'altra evidenza è costituita dalle sorgenti termali. L'aumento di temperatura con la profondità è noto anche dall'esperienza diretta che se ne può fare nelle gallerie e, in particolare, nelle miniere, dove si raggiungono profondità anche di diversi chilometri.

Dato che il calore si trasferisce naturalmente dai corpi più caldi a quelli più freddi, la presenza all'interno della Terra di temperature superiori a quelle superficiali produce un continuo **flusso di calore**,

dall'interno verso la superficie. Il flusso di calore proveniente dall'interno della Terra può essere misurato e risulta in media pari a $8 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$. Si tratta di un valore 5000 volte più piccolo rispetto al flusso di calore che raggiunge la superficie terrestre dal Sole ($4 \times 10^2 \text{ W/m}^2$), tanto che nella valutazione del bilancio energetico della superficie terrestre è di solito trascurato. Nonostante ciò, la dispersione di calore dall'interno della Terra è il principale motore energetico che determina tutta la dinamica interna del nostro pianeta. La Terra può quindi essere vista come un'enorme sfera in via di lento raffreddamento.

Il flusso di calore dall'interno della Terra non è omogeneo. Una serie di misure effettuate sulla superficie del globo permette oggi di ricostruire una mappa del flusso di calore alla superficie [► **Figura 7**].



◀ **Figura 7**
Distribuzione globale del flusso di calore sulla superficie terrestre misurata in mW/m^2 .



La mappa della Figura 7 mette in evidenza variazioni del flusso di calore anche di 10 volte da una zona all'altra ed è un importante indizio della mancanza di omogeneità all'interno del nostro pianeta. Ciò significa che qualsiasi modello dell'interno della Terra basato su una suddivisione in gusci concentrici, distinti in base ai materiali che li costituiscono, risulterà sempre semplicistico e non potrà spiegare alcune caratteristiche, tra cui, per esempio, la distribuzione disomogenea del flusso di calore.

Se è facile individuare nel Sole la sorgente di calore per la dinamica superficiale, ben più difficile è fare ipotesi sulle possibili sorgenti interne di calore. Oggi si ritiene che le due principali siano il calore primordiale e il decadimento radioattivo.

Il processo di formazione della Terra, oltre 4 miliardi di anni fa, si pensa sia stato accompagnato da un forte aumento di temperatura e da un successivo lento raffreddamento. L'energia immagazzinata all'atto della sua formazione è il **calore primordiale**. L'enorme massa della Terra fa sì che la dispersione del calore primordiale sia ancora in atto. Si tratta comunque di un processo che tende ad attenuarsi nel tempo, a mano a mano che l'interno della Terra si raffredda.

Il calore prodotto dal **decadimento radioattivo** è legato invece alla presenza di isotopi radioattivi nelle rocce che costituiscono la Terra solida, come il potassio 40 (^{40}K) o l'uranio 235 (^{235}U). Si tratta anche in questo caso di un processo che tende ad attenuarsi con il tempo a mano a mano che, con il decadimento degli isotopi instabili, diminuisce la quantità di materiale radioattivo.

Un importante parametro strettamente correlato al flusso di calore è l'andamento della temperatura con la profondità. Questo andamento può essere misurato direttamente fino a profondità di qualche kilometro, raggiungibili attraverso le indagini dirette. Nei primi 20 metri di profondità circa, la temperatura delle rocce è influenzata da quella dell'atmosfera sovrastante e quindi varia sia giornalmente sia stagionalmente (in corrispondenza dei fondali marini questo problema invece non si pone, dato che la temperatura dell'acqua risulta praticamente costante). A una profondità variabile da zona a zona, ma in genere attorno ai 20 metri, la temperatura rimane costante ed è pari alla temperatura media dell'aria sovrastante. Oltre questa profondità la temperatura non è influenzata dalle condizioni esterne e la sua variazione con la profondità è mostrata dall'andamento della curva chiamata **geoterma**.

La **geoterma** è la curva che mette in relazione la profondità e la temperatura.

L'aumento di temperatura con la profondità, detto **gradiente geotermico**, può essere misurato con metodi diretti fino a qualche kilometro di profondità massima. In questa zona superficiale esso risulta essere molto elevato, compreso tra 1,5 e 5 °C/100 m. Ciò implicherebbe che la maggior parte dell'interno della Terra sia costituito da materiali fusi, come si pensava prima della scoperta della radioattività. Oggi si ritiene invece che l'elevato gradiente geotermico in prossimità della superficie sia dovuto all'elevata concentrazione di isotopi radioattivi a bassa profondità. Questi infatti sono più abbondanti nei minerali che costituiscono la crosta rispetto a quelli che costituiscono le porzioni più profonde della Terra. A profondità maggiori la concentrazione di materiale radioattivo, che con il suo decadimento produce calore, diminuisce, per cui aumentando la profondità la Terra viene scaldata sempre meno dal decadimento radioattivo e di conseguenza diminuisce il gradiente geotermico. Forti variazioni del gradiente si riscontrano a diverse profondità [► **Figura 8**].

Così come il flusso di calore, anche la geoterma varia in diverse zone della Terra e quelle a maggior flusso di calore presentano un maggiore gradiente geotermico.

Geodesia e termometria ci forniscono un primo insieme di informazioni utili per comprendere le caratteristiche dell'interno della Terra. Possiamo

▼ **Figura 8**
Andamento medio della geoterma all'interno del pianeta Terra. A 3000 km di profondità si ha un brusco aumento della temperatura.



infatti affermare che il nostro pianeta è una sfera il cui interno è costituito da materiali viscosi con una densità media molto superiore a quella delle rocce presenti in superficie. Il carico litostatico fa sì che la pressione aumenti con la profondità. Anche la temperatura aumenta con la profondità. Ciò produce un flusso di calore verso la superficie dovuto al trasferimento sia del calore primordiale sia di quello prodotto dal decadimento radioattivo. La distribuzione

disomogenea del flusso di calore sulla superficie terrestre indica che le caratteristiche dell'interno della Terra non variano unicamente con la profondità ma anche lateralmente.

Il progressivo esaurimento delle sorgenti di calore interno porterà nel tempo a una diminuzione del flusso di calore. Dato che il flusso di calore è il motore della dinamica endogena questa tenderà in futuro a rallentare fino a esaurirsi del tutto.



ORDINE DI GRANDEZZA

Quanto impiega la Terra a raffreddarsi?

Possiamo considerare la Terra come costituita da una sottile crosta dello spessore di pochi chilometri alla temperatura $T_{\text{ext}} = 300 \text{ K}$ e da una sfera interna alla temperatura $T_{\text{int}} = 2500 \text{ K}$.

Si tratta di un modello molto semplice, che non tiene conto del calore prodotto dal decadimento degli elementi radioattivi presenti all'interno della Terra. Può fornirci però una stima del tempo di raffreddamento, cioè del tempo impiegato dall'interno della Terra a raggiungere la temperatura della crosta.

La quantità totale di calore Q che dall'interno fluisce verso l'esterno durante tutto il processo di raffreddamento è pari a:

$$Q = c m (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

dove:

c è il calore specifico del materiale interno alla Terra che supporremo pari a $c = 1,0 \times 10^3 \text{ J/kg K}$;

m è la massa della Terra pari a $m = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$ (non sottraiamo la massa della crosta, già fredda, trascurabile rispetto al totale).

La quantità di calore che fluisce è pari a:

$$Q = 1,0 \times 10^3 \text{ J/kg K} \times 5,97 \times 10^{24} \text{ kg} \times (2500 \text{ K} - 300 \text{ K}) = 1,3 \times 10^{31} \text{ J}$$

La quantità di calore che fluisce attraverso la crosta ogni secondo è:

$$q = \mu \times S$$

dove:

$\mu = 8 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ è il flusso di calore per unità di superficie;

$S = 4\pi R^2 = 5,10 \times 10^{14} \text{ m}^2$ la superficie terrestre.

Ne segue che:

$$q = 8 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \times 5,10 \times 10^{14} \text{ m}^2 = 4,08 \times 10^{13} \text{ J/s}$$

Il tempo di raffreddamento è dato da:

$$t = Q/q = 1,3 \times 10^{31} \text{ J} / 4,08 \times 10^{13} \text{ J/s} = 3,2 \times 10^{17} \text{ s}$$

corrispondenti a circa 10 miliardi di anni.

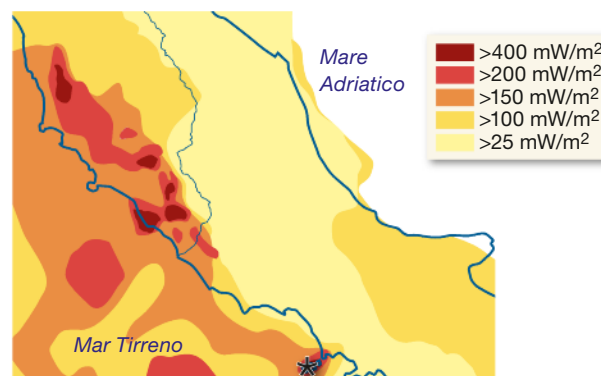
RISPONDI

1. Come cambierebbe il risultato se il calore specifico fosse la metà di quello ipotizzato?
2. Come cambierebbe il risultato se T_{ext} fosse pari alla temperatura sulla superficie di Venere, cioè 740 K ?

PRIMA DI PROSEGUIRE

1. Quali informazioni ci fornisce la geodesia?
2. Perché si ritiene che la densità della Terra aumenti verso il suo interno?
3. Quali sono le evidenze della presenza di temperature elevate all'interno della Terra?
4. Che cos'è la geoterma?
5. Che cosa indica la distribuzione disomogenea del flusso di calore sulla superficie terrestre?
6. **UN PO' DI CALCOLI** Calcola la quantità di calore che in un giorno raggiunge la superficie dall'interno della Terra. Confronta il risultato con l'energia prodotta in un anno da una centrale nucleare di potenza $P = 1 \text{ GW}$.
7. **UN PO' DI CALCOLI** Stima la temperatura al centro della Terra ipotizzando che il gradiente termico si mantenga uniforme e pari a $3,0 \text{ K}$ ogni 100 m . Confronta il risultato con la geoterma della Figura 8.

8. **LEGGI L'IMMAGINE** Osserva l'immagine e rispondi.



- a. Quale porzione della superficie terrestre è raffigurata?
- b. Che cosa rappresentano i diversi colori?
- c. Quale isola è presente in corrispondenza dell'asterisco? Fai una ricerca in Internet per capire perché quest'isola presenta una colorazione rossa.

3

Indagini sismiche

Uno strumento di indagine indiretta di grande importanza per lo studio dell'interno della Terra è l'analisi delle onde sismiche, un tipo di onde meccaniche.

Un'onda meccanica è la propagazione di un'oscillazione della materia di un mezzo solido, liquido o gassoso.

Durante la propagazione di un'onda meccanica la materia del mezzo in cui questa si muove oscilla attorno a una posizione di equilibrio; l'entità di queste oscillazioni è molto piccola rispetto alle distanze percorse dall'onda. Per questo motivo l'onda trasporta l'energia che produce le oscillazioni, ma non la materia. Perché si produca un'onda meccanica è necessaria una fonte di energia dalla quale si dipartono le onde. Se la fonte ha dimensioni molto piccole rispetto alla distanza percorsa dalle onde, essa può essere approssimata con un punto, si parla allora di sorgente puntiforme.

Un'onda sismica è un'onda meccanica che si propaga all'interno e sulla superficie della Terra.

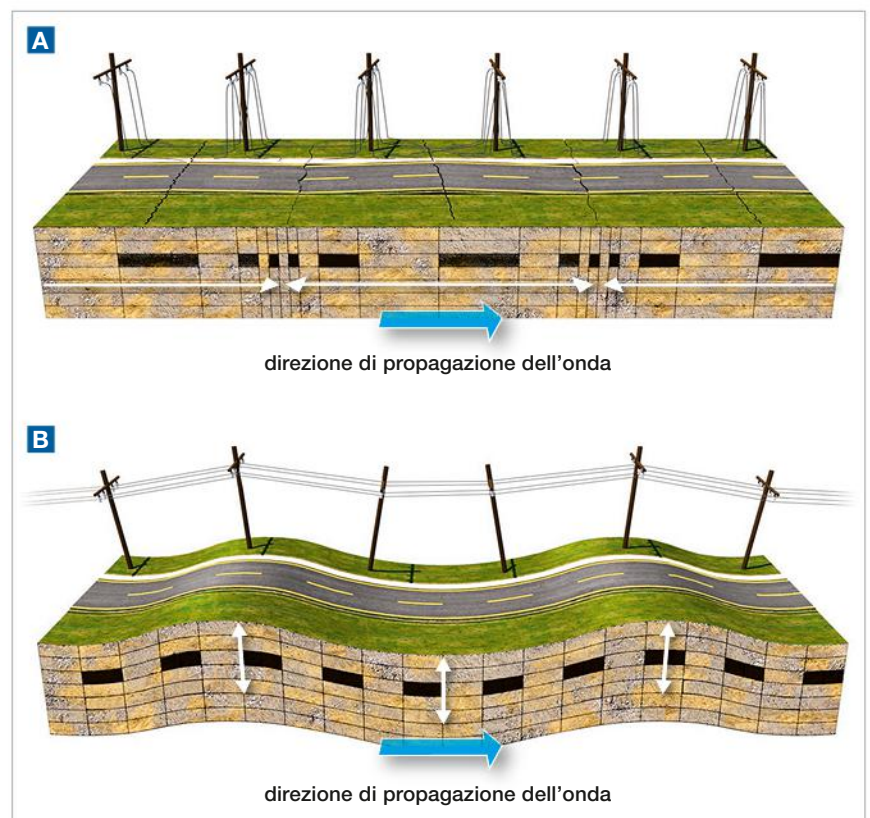
La sorgente più comune delle onde sismiche è quella che produce maggiore energia è la fratturazione delle rocce. Altre *sorgenti naturali* di onde sismiche sono le frane e le eruzioni vulcaniche. *Sorgenti artificiali* sono invece le esplosioni o la caduta di masse al suolo. Qualsiasi sia la sorgente delle onde sismiche, è sempre possibile distinguere due diverse tipologie, all'interno della Terra, in funzione della modalità con cui avviene l'oscillazione del materiale che esse attraversano.

- Le **onde P** (onde primarie) sono onde di pressione e si producono per oscillazione longitudinale, cioè nella stessa direzione di propagazione dell'onda, producendo compressione e decompressione alternate [► **Figura 9A**]. Esse si propagano in tutti i materiali soggetti a variazioni di volume quindi, in particolare, sia in quelli solidi sia in quelli liquidi.
- Le **onde S** (onde secondarie) sono onde trasversali o di taglio, dall'inglese *shear*, e si producono per oscillazione ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda [► **Figura 9B**]. Esse si propagano in tutti i materiali che oppongono resistenza alla deformazione, quindi nei solidi ma non nei liquidi.

Non possiamo seguire la propagazione dell'onda attraverso l'interno della Terra, tutto quello che possiamo fare è registrarla in superficie attraverso degli strumenti detti **sismografi**. Essi rappresentano graficamente i movimenti del terreno sottostante mediante un **sismogramma** [► **Figura 10**] che registra prima le onde P, più veloci, poi le onde S, più lente. La lettura del sismogramma permette di ricostruire le caratteristiche del terremoto, come la sua entità e la distanza del punto di osservazione dall'origine del fenomeno.

Le **onde sismiche artificiali**, prodotte da esplosioni controllate e da masse lasciate cadere al suolo, sono molto utili per le indagini a piccola profondità, fino ad alcuni chilometri, dato che di esse si conoscono esattamente il momento dell'innesco, l'intensità e la posizione della fonte di energia. Sarà quindi possibile posizionare una rete di sismografi nel modo migliore per ottenere il maggior numero di informazioni. Queste onde non sono però adatte allo studio dell'interno della Terra in profondità,

▼ **Figura 9**
Rappresentazione delle onde P (**A**), e delle onde S (**B**). Le frecce bianche rappresentano la direzione di oscillazione.



dato che la fonte di energia non è abbastanza potente e le onde si attenuano rapidamente per dispersione dell'energia durante la propagazione. Esse sono invece molto utili, per esempio, per la ricerca di giacimenti petroliferi.

I **terremoti naturali**, grazie alla loro elevata energia, sono la principale sorgente di onde sismiche usate per lo studio dell'interno della Terra. Essi presentano però alcuni svantaggi, in particolare non è noto il momento dell'innesco, che va ricostruito a posteriori.

La ricostruzione delle caratteristiche dell'interno della Terra a partire dalle onde sismiche si basa su alcune loro proprietà:

- si propagano in linea retta all'interno di mezzi omogenei;
- la loro velocità di propagazione dipende dalla densità e dalla elasticità dei materiali attraversati; la velocità v di propagazione è data da:

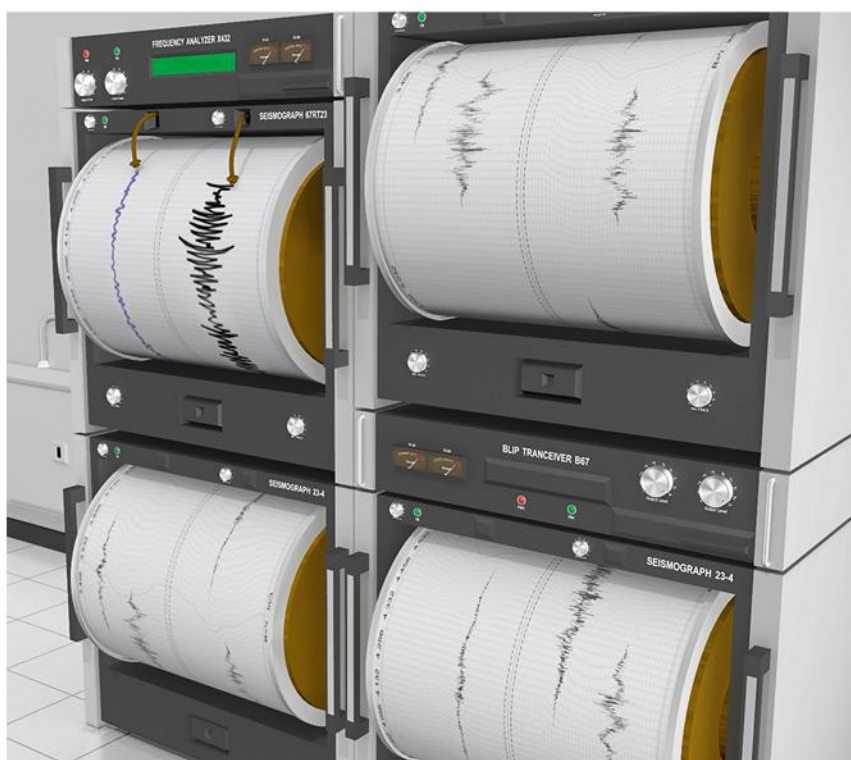
$$v = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

nella quale M rappresenta la costante elastica caratteristica del mezzo materiale attraversato e ρ la sua densità;

- sono deviate, poiché subiscono rifrazione e riflessione, quando incontrano una superficie in cui i materiali attraversati presentano una brusca variazione delle loro proprietà, in particolare della densità;
- le onde S si propagano unicamente nei materiali solidi.

La prima importante applicazione delle onde sismiche allo studio dell'interno della Terra si deve al lavoro del sismologo croato **Andrija Mohorovičić**, ai primi del Novecento. Egli osservò dei tempi di arrivo anomali ai sismografi delle onde sismiche di un terremoto, interpretandoli come dovuti a variazioni della velocità delle onde stesse (vedi approfondimento in pdf). Tali variazioni derivano dalla presenza di una superficie a circa 40 km di profondità, lungo la quale una brusca variazione di densità produce la variazione di velocità osservata. Questa superficie è stata in seguito individuata in tutto il mondo e chiamata **discontinuità di Mohorovičić**, o, in breve, **Moho**.

Molta strada è stata fatta dagli studi pionieristici di Mohorovičić. Oggi la **sismica** costituisce il principale strumento di indagine indiretto dell'interno della Terra e si basa su una ricostruzione accurata delle traiettorie delle onde sismiche. Si tratta di un'operazione molto complessa, dato che gli unici dati disponibili sono quelli della rete mondiale di sismografi presenti in superficie. Essa prevede una



serie di calcoli che vengono svolti in più fasi, oggi semplificate dall'uso di appositi software, che permettono di analizzare enormi quantità di dati.

La prima operazione consiste nell'individuare la *posizione della sorgente*, che, alla scala globale a cui si lavora, può essere considerata puntiforme.

Successivamente si costruisce, sulla base di conoscenze geologiche pregresse, un *modello* dell'interno della Terra, le cui informazioni fondamentali sono la densità dei materiali attraversati e la presenza di superfici di discontinuità.

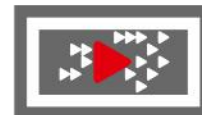
Infine si confronta la distribuzione, misurata in superficie, dei *tempi di arrivo* ai sismografi delle onde sismiche con quella calcolata a partire dal modello. In una serie di iterazioni cicliche, poi, si modifica il modello fino a ottenere la migliore sovrapposizione dei dati calcolati con quelli osservati. Questa operazione permette di ricostruire le traiettorie e le velocità delle onde sismiche all'interno della Terra – queste ultime devono essere trasformate in valori di densità dei materiali attraversati. A tale scopo ci si basa su misurazioni in laboratorio della velocità con cui le onde sismiche attraversano diversi tipi di rocce, che si pensa possano essere presenti all'interno della Terra.

Il passaggio finale, consistente nel ricostruire la tipologia e la distribuzione dei materiali all'interno della Terra, è ancora più complesso e incerto dato che materiali diversi possono avere la stessa densità.

▲ **Figura 10**

Il pennino del sismografo scrive su un rullo di carta scorrevole lasciando una traccia detta **sismogramma**.

GUARDA!



VIDEO
Le onde sismiche attraverso materiali differenti



PDF
La Moho e il suo scopritore

CAPIRE LE PAROLE

La parola **discontinuità** indica un'interruzione nel tempo o nello spazio (dal prefisso *dis-*, che esprime separazione/allontanamento + continuità). Il prefisso *dis-* ricorre anche in altre parole, spesso per rovesciarne il significato positivo (per es. *disonore*, *dispiacere*).

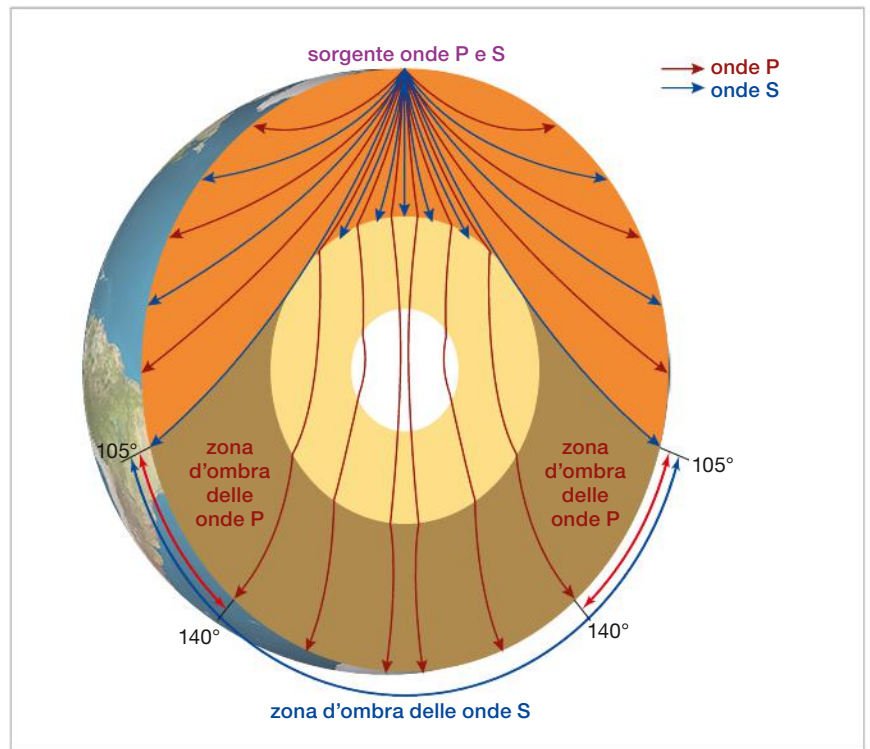


La distribuzione globale delle traiettorie delle onde P e S all'interno della Terra è riportata in **Figura 11**. La loro lettura permette di ricostruire molti aspetti dell'interno del nostro pianeta.

- Le traiettorie curve sia delle onde P sia delle onde S indicano un progressivo e graduale aumento della densità con la profondità.
- L'esistenza di una *zona d'ombra* in cui le onde P non giungono, tra 105° e 140° dal punto di innescio, mostra la presenza in profondità di una importante discontinuità.
- L'assenza di onde S oltre i 105° denota che il materiale al di sotto di questa discontinuità è liquido.
- La distribuzione anomala delle onde P oltre i 140° indica la presenza di una seconda discontinuità, al di sotto della quale il materiale torna a essere solido.

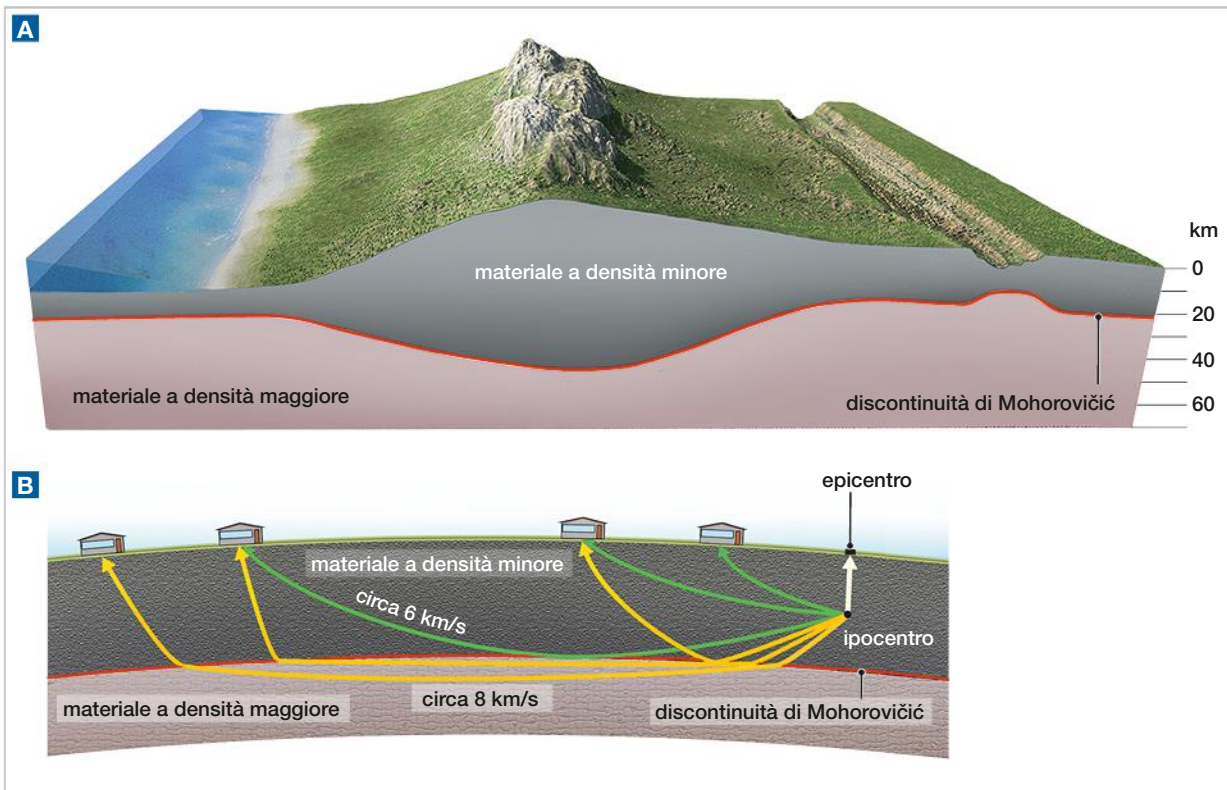
Il modello di **Figura 11** è molto semplificato e rappresenta l'andamento generale delle traiettorie delle onde sismiche a scala globale. In questo modello, che ha una scala molto piccola, non è segnata la discontinuità di Mohorovičić, che si trova a bassa profondità, meno dell'1%, rispetto al raggio terrestre, e la sorgente del terremoto è riportata in superficie.

In prossimità della superficie terrestre la traiettoria delle onde sismiche può essere calcolata con maggiore precisione, per cui nei primi 60 km di



profondità si è potuto ricostruire in modo preciso l'andamento della discontinuità di Mohorovičić [**Figura 12**]. Essa ha profondità molto variabili, da circa 5 km fino a oltre 60 km, confermando la presenza di eterogeneità laterali all'interno della Terra, già riscontrate con le indagini termiche (rivedi **Figura 7**).

▲ **Figura 11**
Propagazione delle onde sismiche all'interno della Terra.



◀ **Figura 12**
(A) Lo studio delle onde sismiche ha permesso di comprendere l'andamento della discontinuità di Mohorovičić. (B) In verde sono indicate le traiettorie delle onde che non raggiungono la discontinuità di Mohorovičić, in giallo quelle che raggiungono la discontinuità e vengono da questa deviate.

■ La tomografia sismica

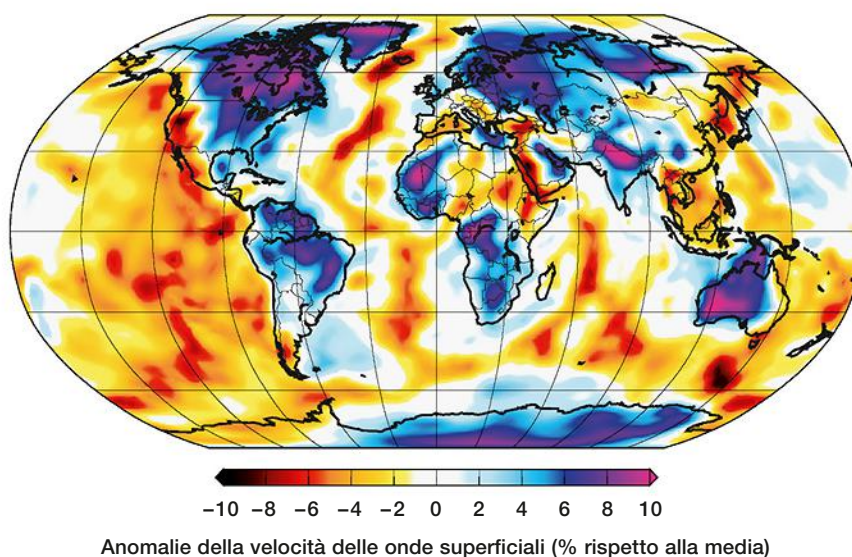
La tecnica che negli ultimi anni ha dato i risultati migliori nello studio dettagliato dell'interno della Terra è la **tomografia sismica**. Essa, a differenza delle tecniche tradizionali, non si basa sullo studio delle onde P e S, ma su quello delle onde superficiali. Queste sono le onde sismiche che si propagano sulla superficie terrestre, dando luogo a oscillazioni orizzontali e verticali. Le modalità e le velocità di propagazione di queste ultime dipendono fortemente dalle caratteristiche fisiche del sottosuolo. Mentre le onde superficiali a bassa lunghezza d'onda non danno informazioni sul sottosuolo, lo studio di quelle a elevata lunghezza d'onda (nell'ordine delle centinaia di chilometri) fornisce utili informazioni fino a grandi profondità. Le onde superficiali sono infatti influenzate dalle rocce sottostanti fino a profondità pari a circa metà della loro lunghezza d'onda. Analizzando l'enorme mole di dati oggi disponibili è quindi possibile ricostruire delle mappe globali

delle anomalie della velocità di propagazione delle onde sismiche a diverse profondità [► **Figura 13**].

La tomografia sismica mette in evidenza forti eterogeneità nell'interno della Terra fino a grandi profondità. L'interpretazione dei dati tomografici permette inoltre di ricostruire mappe tridimensionali sempre più precise di parametri quali la densità o la temperatura. Queste, a loro volta, possono essere utilizzate per comprendere come funziona il motore energetico che determina tutta la dinamica interna del nostro pianeta e influisce fortemente sui processi che avvengono in superficie.

CAPIRE LE PAROLE

Tomografia deriva dal greco *tómos*, sezione, strato + la radice del verbo *gráfo*, scrivere. Indica la tecnologia che permette di avere immagini dettagliate di una sezione tridimensionale di un corpo. Il termine è usato perlopiù in medicina, in riferimento a diverse tecniche diagnostiche.

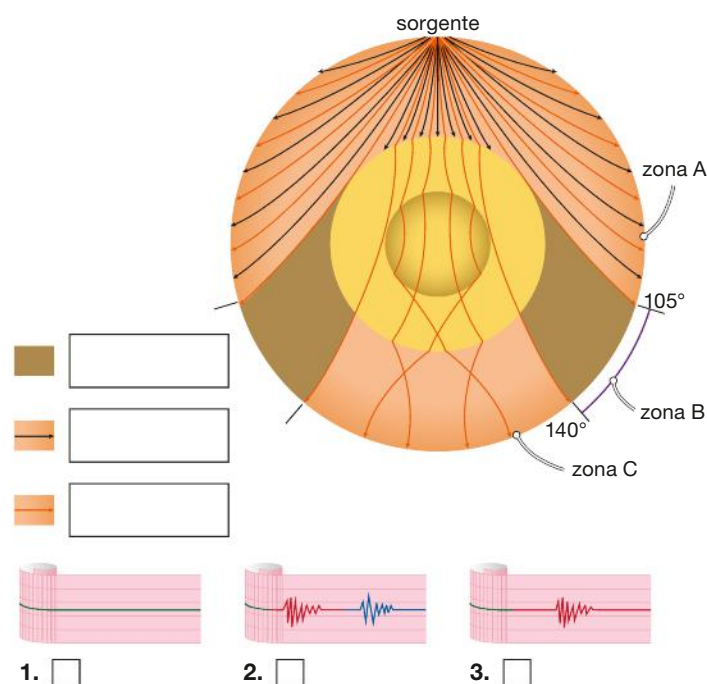


► **Figura 13**

Anomalie della velocità delle onde sismiche superficiali corrispondente a una profondità di 100 km. Le alte velocità indicano basse temperature, al contrario basse velocità indicano alte temperature o rocce parzialmente fuse.

PRIMA DI PROSEGUIRE

1. Che cos'è un'onda sismica?
2. Quante tipologie di onde sismiche si possono distinguere e in funzione di che cosa sono distinte?
3. Che cosa è possibile ricostruire attraverso lo studio della propagazione delle onde sismiche e perché?
4. Qual è la tecnica che negli ultimi anni ha dato i migliori risultati nello studio dell'interno della Terra? Descrivila brevemente.
5. **UN PO' DI CALCOLI** Supponendo che la velocità di propagazione di un'onda sismica sia di 6 km/s in un basalto e 4,5 km/s in una roccia calcarea, calcola la differenza dei tempi di arrivo a una stazione sismica che si trova a 300 km dal punto di origine del terremoto, nel caso che l'onda attraversi rocce basaltiche o calcaree.
6. **UN PO' DI CALCOLI** Come cambia la velocità v di un'onda P se il modulo M della costante elastica quadruplica e la densità ρ raddoppia?
7. **LEGGI L'IMMAGINE** Osserva l'immagine e completa gli appositi spazi. Poi associa ciascun sismogramma alla zona in cui è stato registrato.





4

Indagini magnetiche

Le forze magnetiche sono note dall'antichità, grazie all'osservazione che alcuni minerali, il più comune dei quali è la magnetite, hanno la capacità di attirare il ferro. Circa 1000 anni fa venne perfezionata in Cina quella che è da allora la più nota applicazione del magnetismo: la *bussola ad ago magnetico*. Nel XIX secolo si capì che i fenomeni elettrici e magnetici erano correlati e, grazie soprattutto al fisico scozzese J. C. Maxwell, si arrivò a una descrizione teorica unitaria. Da allora si parla di **elettromagnetismo**.

La presenza del **campo magnetico terrestre** può essere facilmente verificata su tutta la superficie terrestre attraverso un ago magnetizzato. Esso, lasciato libero di muoversi, si dispone lungo le linee del campo magnetico terrestre. In ogni punto il **vettore campo magnetico** \vec{F} è caratterizzato da **intensità** (misurata in nanoTesla, nT), **direzione** (la retta su cui giace il vettore) e **verso** (l'orientamento del vettore). Il vettore \vec{F} può essere scomposto nella componente orizzontale totale \vec{H} e nella componente verticale \vec{Z} . La **declinazione magnetica** d è l'angolo che la componente \vec{H} forma con la direzione nord,

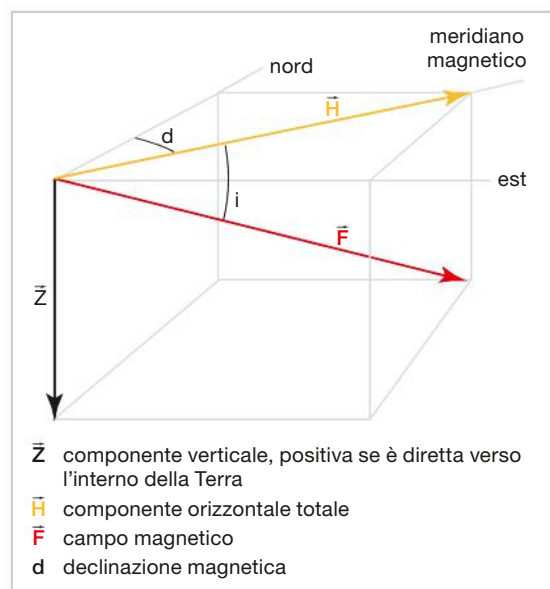
l'**inclinazione magnetica** i è l'angolo che il vettore \vec{F} forma con la componente \vec{H} [► Figura 14].

Oggi l'andamento del campo magnetico terrestre è noto in dettaglio non solo su tutta la superficie terrestre, ma anche in atmosfera e nello spazio. Il suo andamento all'interno della Terra non può essere misurato ed è quindi calcolato. L'insieme dei dati raccolti indica che il campo magnetico terrestre può essere assimilato a un *campo dipolare*, come se fosse prodotto da una barra magnetica immaginaria posta circa al centro della Terra. I poli magnetici però non coincidono con quelli geografici, e ciò indica che il dipolo con cui è possibile simulare il campo non è allineato con l'asse terrestre [► Figura 15].

Inizialmente si pensò che nelle profondità della Terra potesse esserci un magnete naturale permanente, ma ben presto si scoprì che le temperature sono troppo elevate perché possa essere mantenuta una magnetizzazione permanente. Il modello oggi più accreditato per l'origine del campo magnetico terrestre è quello della **dinamo autoeccitante**. Esso parte dal presupposto che all'interno della Terra esistano dei materiali metallici liquidi che possono

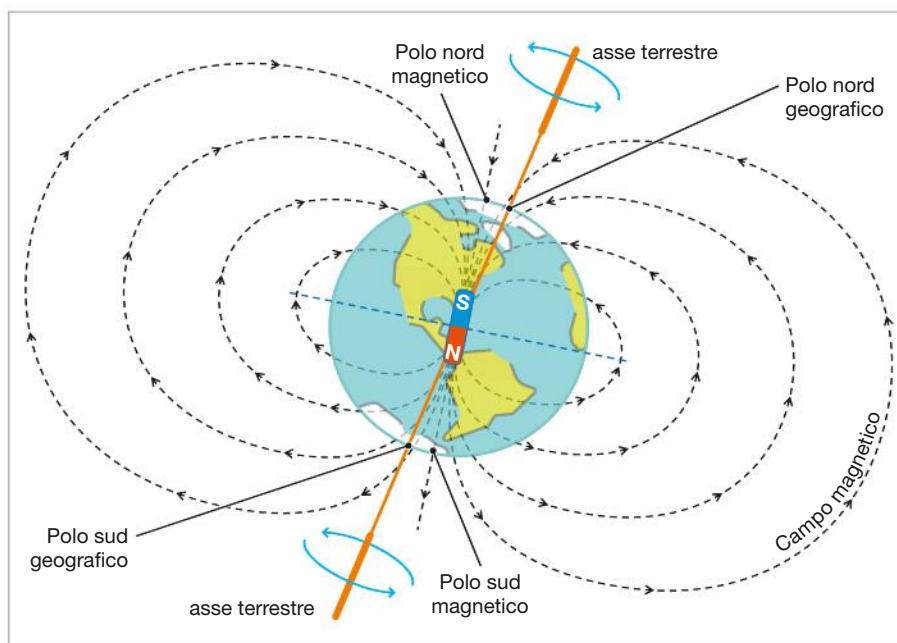
CAPIRE LE PAROLE

Magnetismo deriva dal latino *magnes*, a sua volta derivante dal greco *magnēs (lithos)*, pietra di Magnesia, espressione con la quale i Greci indicavano la magnetite, che abbondava nei dintorni della città di Magnesia, nell'attuale Turchia.



▲ Figura 14

Il campo magnetico terrestre può essere rappresentato con un vettore (\vec{F}) orientato rispetto alle coordinate geografiche. La declinazione (d) è l'angolo tra la direzione del nord e la sua proiezione (\vec{H}) sul piano orizzontale e l'inclinazione (i) è l'angolo che forma con il piano orizzontale.



▲ Figura 15

Rappresentazione del campo magnetico terrestre, con al centro la barra magnetica immaginaria che produrrebbe linee del campo analoghe a quelle osservate. Per convenzione il Polo nord magnetico corrisponde al Polo sud del magnete immaginario.

fluire, generando una corrente elettrica. Sappiamo già che le indagini sismiche hanno evidenziato la presenza di una zona liquida all'interno della Terra, tra la prima e la seconda discontinuità profonde (rivedi Figura 11). Questa zona, secondo il modello della dinamo autoeccitante, è quella dove si genera il campo magnetico terrestre. Qui i movimenti circolari di materia danno luogo a un flusso di massa ed energia che, interagendo con un campo magnetico iniziale molto debole, formatosi per fluttuazioni casuali, avrebbe prodotto una corrente elettrica, che a sua volta avrebbe generato un campo magnetico. Così si spiega l'autosostentamento del campo elettromagnetico [► Figura 16].

L'esistenza stessa del campo magnetico terrestre ci conferma la presenza di materiale liquido nelle profondità della Terra e ci fornisce un'altra importante informazione: quel materiale liquido è in costante movimento. Tale moto, dovuto agli effetti combinati della rotazione terrestre e del contrasto

tra liquidi a diversa temperatura, è quello che genera il campo magnetico.

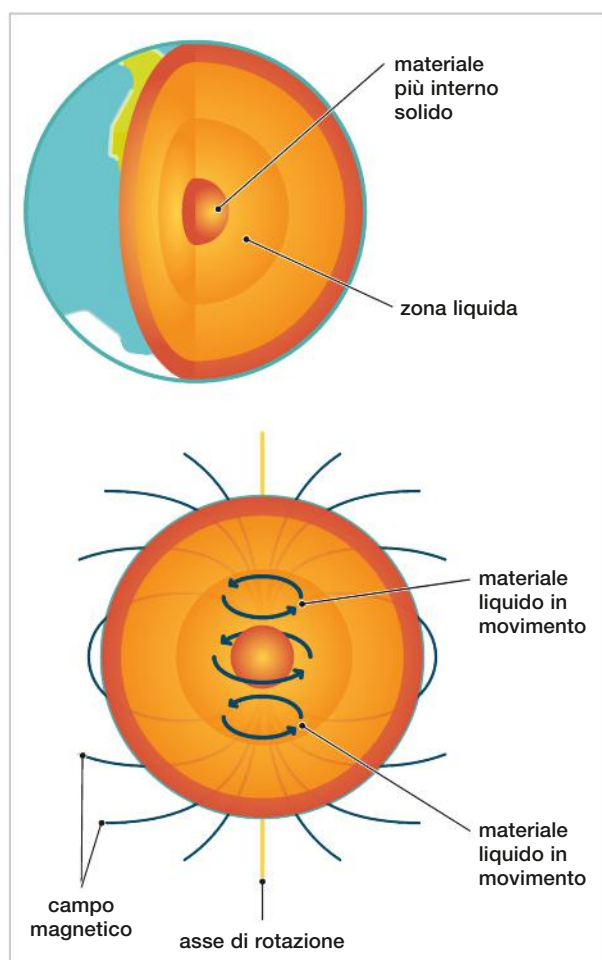
Una mappa dell'intensità del campo magnetico [► Figura 17] mette poi in evidenza la sua forte irregolarità, avvalorando ulteriormente l'osservazione, già fatta, che l'interno della Terra non può essere modellizzato accuratamente con un semplice schema che lo suddivide in gusci concentrici di materiali diversi.

■ Le inversioni di polarità

Finora abbiamo trattato il campo magnetico terrestre senza considerare le sue variazioni nel tempo. Alla scala temporale degli anni si osserva una continua migrazione dei poli magnetici. Attualmente il Polo nord magnetico, dopo avere stazionato a lungo nelle isole artiche canadesi, si sta muovendo rapidamente verso la Russia, attraverso il Mar Glaciale Artico, a una velocità di circa 40 km all'anno [► Figura 18].

▼ Figura 17

La mappa del campo magnetico terrestre evidenzia delle forti disomogeneità.

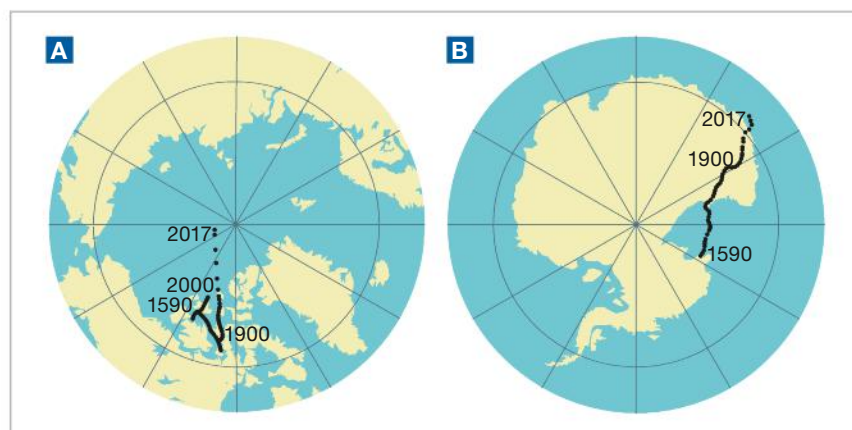
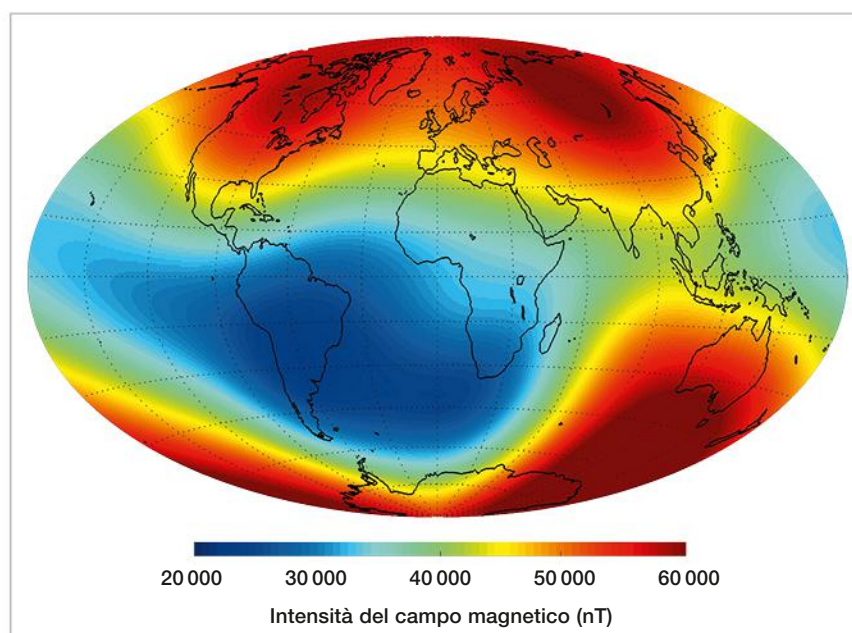


▲ Figura 16

Il materiale liquido interno in costante movimento a causa della rotazione terrestre genera il campo magnetico terrestre.

► Figura 18

Posizionamento del Polo nord (A) e sud (B) magnetico dal 1590 al 2017.





Alla scala delle centinaia di migliaia di anni si osservano invece brusche inversioni di polarità del campo magnetico, per cui il Polo sud e il Polo nord magnetico in un periodo breve, probabilmente di solo qualche secolo, si invertono. Queste inversioni di polarità sono registrate dalle rocce magmatiche che, al momento della formazione, acquisiscono e mantengono un magnetismo permanente allineato a quello del campo terrestre presente al momento. Si contano almeno 20 inversioni di polarità negli ultimi 5 milioni di anni di storia della Terra, l'ultima delle quali è avvenuta circa 780 000 anni fa.

La presenza di **rocce magnetizzate** dal campo terrestre di età superiore ai 3 miliardi di anni ci assicura infine che il campo magnetico si è formato presto nella storia della Terra.

Alcune simulazioni, sviluppate di recente attraverso software specifici per lo studio del movimento dei materiali liquidi all'interno della Terra, sono in grado di simulare le inversioni di polarità del campo magnetico, ma non di prevedere quando avverranno. Esse ci forniscono l'ulteriore informazione che il movimento delle masse liquide nelle profondità della Terra avviene alla velocità di circa 2 cm/s.



MINILAB

Rendiamo visibile l'invisibile

Attraverso questa esperienza costruiremo una rappresentazione del campo magnetico terrestre.

Che cosa ti serve

- 1 magnete rettangolare
- 4 spessori alti come il magnete
- limatura di ferro
- foglio di cartoncino bianco formato A3
- pennarello
- matita
- filo di cotone

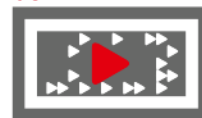
Che cosa devi fare

1. Poni il magnete sopra al foglio di cartoncino e con la matita ripassa il suo contorno.
2. Sposta il magnete sotto il foglio; per mantenere il foglio perfettamente orizzontale aiutati con gli spessori da posizionare sotto il foglio.
3. Fai cadere a pioggia la limatura di ferro attorno al magnete in modo uniforme.
4. Fai una fotografia con il cellulare.
5. Ripeti i punti 1, 2, 3 e 4 variando la posizione del magnete.
6. Osserva come si dispone la limatura di ferro.

RISPONDI

1. Come si dispone la limatura attorno al magnete? Descrivilo a parole e, scegliendo una delle prove che hai fatto, disegna sul foglio di cartoncino.
2. A che cosa puoi assimilare quello che osservi sul foglio di cartoncino?
3. Utilizzando il filo di cotone, trova un modo per determinare il Polo nord del magnete ed evidenzialo con un pennarello con la lettera N.
4. Sfruttando il metodo che hai trovato per determinare il Polo nord del magnete utilizza la sua disposizione per trovare i punti cardinali.

GUARDA!



Guarda
l'esperienza



PRIMA DI PROSEGUIRE

1. Quali sono le componenti che caratterizzano il campo magnetico terrestre?
2. Come puoi descrivere brevemente il campo magnetico terrestre?
3. Qual è il modello più accreditato per descrivere l'origine del campo magnetico terrestre?
4. I poli magnetici sono fissi?
5. **UN PO' DI CALCOLI** Supponendo che il Polo nord magnetico continui a muoversi come tra il 2000 e il 2017 (Figura 18A), in quale anno possiamo stimare raggiungerà le coste della Siberia?
6. **INDAGA E RIFLETTI** Pensi che ci siano dei posti sulla Terra in cui l'ago della bussola indichi l'est o l'ovest invece che il nord? Ritieni che potrebbe addirittura indicare il sud? Dove? E che cosa puoi ipotizzare che succeda esattamente in corrispondenza dei poli magnetici?

5

I modelli dell'interno della Terra

In assenza di informazioni attendibili, nel corso dei secoli sono state formulate numerose ipotesi fantasiose sull'interno della Terra. È solo agli inizi del secolo scorso che lo sviluppo tecnologico ha consentito di costruire modelli scientificamente fondati a partire dalle osservazioni di Mohorovičić sulla propagazione delle onde sismiche. Il rapido sviluppo dei metodi di indagine negli ultimi cento anni ha portato a una altrettanto rapida evoluzione dei modelli, che tuttavia presentano ancora diverse incertezze.

Possiamo distinguere due tipi di modelli, coi quali cerchiamo di rispondere a quesiti diversi sull'interno della Terra. Un primo tipo di modello è il **modello composizionale**, che suddivide l'interno della Terra in funzione di ipotesi sui materiali che lo costituiscono. Il secondo tipo è il **modello reologico**. La **reologia** di un materiale è la modalità con cui questo si deforma o scorre quando è soggetto a sollecitazioni.

I modelli composizionali sono stati sviluppati per primi e hanno fornito la nomenclatura delle suddivisioni dell'interno della Terra che ancora oggi è la più conosciuta. I modelli reologici, che richiedono una maggiore quantità di informazioni e una superiore capacità di elaborazione, sono più recenti e ancora oggi in rapida evoluzione. Essi sono di grande interesse perché costituiscono la base per comprendere la dinamica terrestre. I processi en-

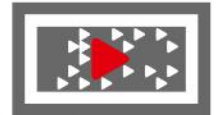
dogeni osservabili in superficie (terremoti, eruzioni, formazione di catene montuose ecc.) dipendono essenzialmente dalle caratteristiche reologiche dell'interno della Terra.

Il modello composizionale

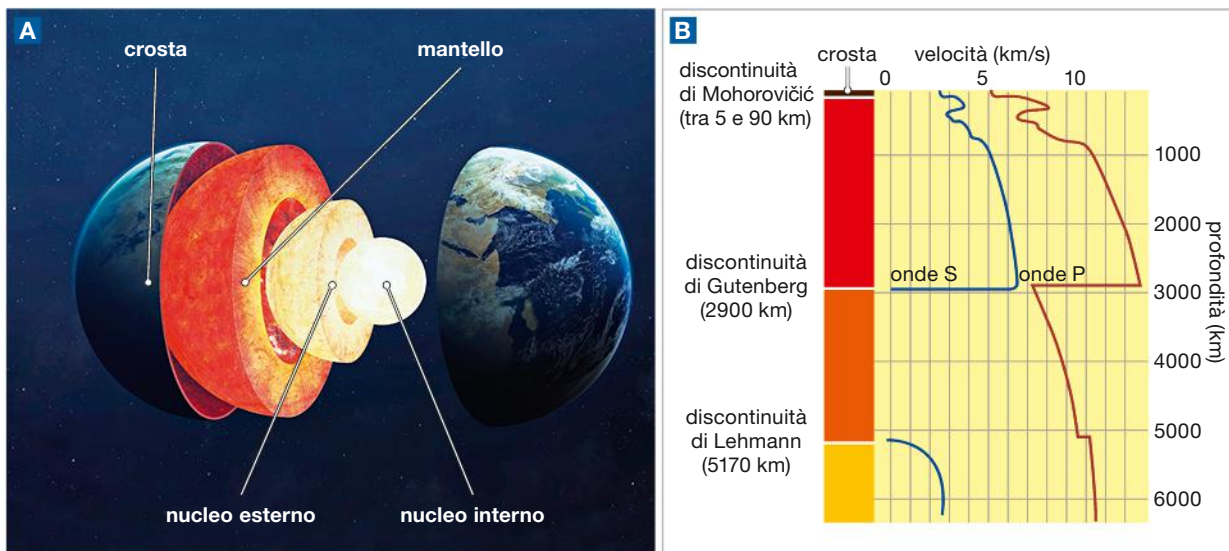
Lo strumento che ha fornito informazioni più dettagliate sulla struttura interna della Terra è l'indagine sismica. I dati offerti da questo tipo di indagine hanno quindi costituito la base per la costruzione del modello composizionale.

L'interno della Terra è suddiviso in tre grandi volumi concentrici, che prendono il nome, dall'esterno verso l'interno, di **crosta**, **mantello** e **nucleo** [► Figura 19A]. Questi volumi sono separati dalle due maggiori superfici di discontinuità dedotte dalle brusche variazioni di velocità delle onde sismiche [► Figura 19B]. La **discontinuità di Mohorovičić** è caratterizzata da un rapido aumento della velocità delle onde sismiche e separa la crosta dal mantello; la **discontinuità di Gutenberg** causa la presenza di una zona d'ombra delle onde P tra 105° e 140° e separa il mantello dal nucleo. Una terza discontinuità, la **discontinuità di Lehmann**, separa il nucleo esterno liquido dal nucleo interno solido. A oggi non è ancora noto se le due parti del nucleo presentino delle diversità composizionali.

GUARDA!



VIDEO
Gli involucri terrestri



◀ **Figura 19**
(A) Modello composizionale dell'interno della Terra. (B) Propagazione delle onde sismiche P e S all'interno della Terra; le discontinuità di Mohorovičić e Gutenberg sono evidenziate da una brusca variazione di velocità delle onde P e S. La presenza di onde S nel nucleo interno si deduce da osservazioni indirette.



La maggior parte della Terra è costituita dal mantello (84%), contro il 15% del nucleo e solo l'1% della crosta. Quindi le dimensioni di questi tre volumi sono molto diverse [► Figura 20].

La **crosta** è l'unica porzione della Terra accessibile attraverso perforazioni, anche se limitatamente alla sua porzione più superficiale. Essa ha uno spessore molto variabile, da meno di 5 km fino a circa 90 km, e può essere suddivisa in crosta oceanica e crosta continentale [► Figura 21].

La **crosta continentale** ha spessori molto variabili, da 10-20 km, nelle zone di transizione verso la crosta oceanica, fino a circa 90 km. La sua densità media è di $2,7 \text{ g/cm}^3$ ed è caratterizzata da una forte variabilità interna. Le rocce che la compongono sono molto diverse, spesso fortemente deformate e costituite principalmente da silicio e alluminio. Anche la superficie topografica della crosta continentale è molto articolata, con differenze fino a circa 9 km tra i maggiori rilievi e le aree più depresse.

La **crosta oceanica** ha spessori ridotti, che non superano i 10 km e una densità di circa $2,9 \text{ g/cm}^3$. Essa è sistematicamente meno elevata rispetto alla crosta continentale, andando a formare grandi e profondi bacini che sono occupati dagli oceani. Le rocce che la compongono sono più uniformi e meno deformate rispetto a quelle della crosta continentale e costituite principalmente da silicio e magnesio. Il rilievo topografico della crosta oceanica, benché le forme siano piuttosto dolci, risulta anche più accentuato di quello della crosta continentale, con differenze di altitudine che arrivano a superare i 15 km.

Il **mantello** si estende al di sotto della discontinuità di Mohorovičić, fino a una profondità di 2900 km, corrispondente alla discontinuità di Gutenberg. Esso ha una densità variabile, che aumenta da $3,3$ a $5,7 \text{ g/cm}^3$ con la profondità. La presenza di brusche variazioni di densità all'interno del mantello permette di distinguere tre zone sovrapposte:

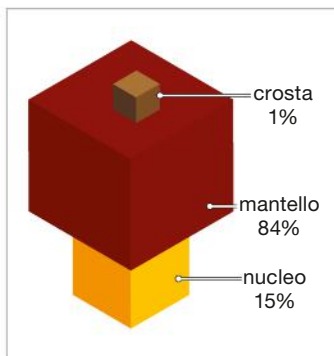
- il **mantello superiore**, che si estende dalla discontinuità di Mohorovičić fino a 410 km di profondità;
- la **zona di transizione** tra 410 e 660 km di profondità;
- il **mantello inferiore** da 660 km di profondità fino alla discontinuità di Gutenberg.

Le rocce che costituiscono il mantello superiore sono note grazie alle indagini dirette. I processi geologici hanno infatti portato in superficie porzioni di mantello superiore. In particolare gli **xenoliti**, frammenti di mantello risaliti in superficie rapidamente nei condotti vulcanici, indicano che le rocce del mantello superiore appartengono alla famiglia delle **peridotiti**, il cui minerale più abbondante è l'olivina (vedi Unità 3). Le composizioni della zona di transizione e del mantello inferiore non sono deducibili da indagini dirette. Si pensa che in queste zone siano presenti minerali analoghi all'olivina, ma con una struttura più compatta nella zona di transizione e ancora più compatta nel mantello inferiore.

Il **nucleo** si estende da 2900 km di profondità fino al centro della Terra, per un raggio di circa 3500 km. Esso ha una densità estremamente elevata, che aumenta verso il centro, variando da $9,7$ a 13 g/cm^3 . Alla profondità di 5170 km la **discontinuità di Lehmann** è segnalata da una brusca variazione nelle traiettorie delle onde P. Dal punto di vista composizionale il nucleo è la porzione più misteriosa della Terra. Le ipotesi formulate si basano sui dati di densità, sulla composizione di alcune meteoriti e su considerazioni relative all'abbondanza di elementi nel Sistema solare e nell'Universo. Oggi si ritiene che il nucleo sia costituito principalmente da **ferro**, a cui si aggiungono piccole quantità di **nichel**, circa il 4%, e di un elemento più leggero che potrebbe essere silicio, zolfo, carbonio oppure ossigeno. Le ricerche più recenti ipotizzano la presenza, in proporzioni diverse, di tutti e quattro questi elementi leggeri.

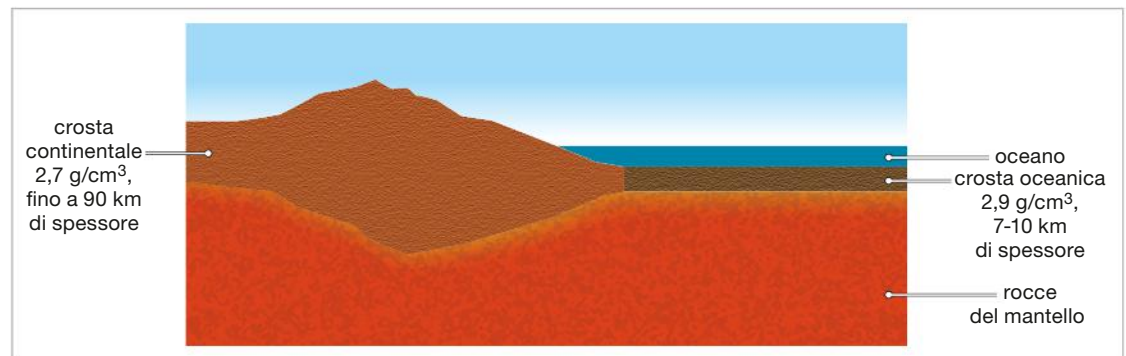
▼ Figura 21

La crosta terrestre è molto eterogenea; la distinzione più importante riguarda quella tra crosta continentale e crosta oceanica.



▲ Figura 20

La maggior parte del volume della Terra è costituito dal mantello; i cubi hanno volumi proporzionali a quelli rispettivi di nucleo, mantello e crosta.



■ Il modello reologico

Il modello reologico dell'interno della Terra si pone come obiettivo la comprensione della dinamica interna del pianeta e in particolare della capacità che hanno i materiali presenti al suo interno di fluire.

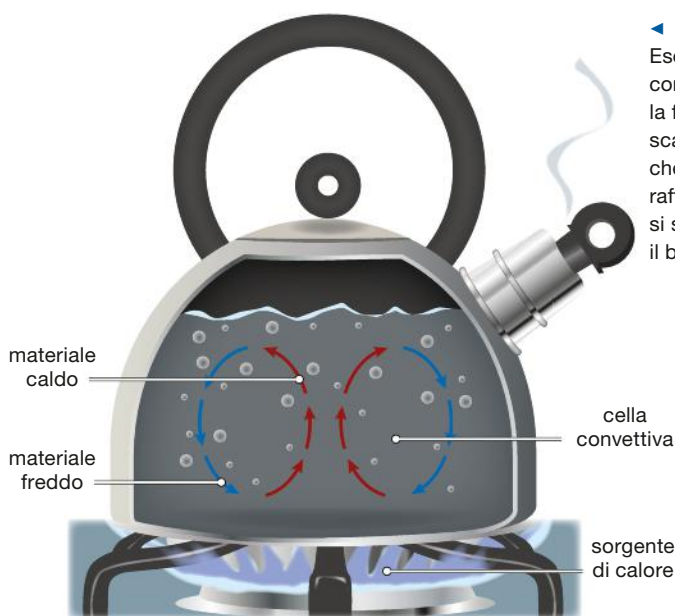
La Terra è un pianeta dinamico, come testimoniano i processi che possiamo osservare in superficie. Parte della dinamica superficiale è da imputare agli agenti esogeni, il cui motore energetico è costituito dall'energia solare che colpisce la superficie terrestre. Alla dinamica esogena si accompagna una dinamica endogena, osservabile in superficie, ma che ha origine nel motore energetico profondo. Questo è costituito dal processo di raffreddamento del pianeta a partire dalla sua formazione, a cui si aggiunge il rilascio di energia dovuto al decadimento di materiali radioattivi presenti al suo interno. Il modello reologico suddivide l'interno della Terra in funzione della risposta delle sue diverse porzioni al processo di trasferimento di calore verso la superficie. In un fluido infatti i moti sono determinati dal trasferimento di calore dalle parti più calde a quelle più fredde di un corpo.

La **convezione** è una modalità di trasferimento del calore molto efficiente, ma essa può operare solo su materiali fluidi, che si muovono a causa dei cambiamenti di densità che avvengono al variare della temperatura. Una sorgente di calore posta in basso produce in un fluido delle correnti convettive disposte in circuiti chiusi verticali, detti **celle convettive** [► Figura 22].

Nei materiali non fluidi il calore si propaga invece per **conduzione**, cioè attraverso il trasferimento dei moti di vibrazione tra particelle a contatto fra di loro, senza che vi sia spostamento di materia.

Il parametro più importante per determinare la modalità di trasferimento di calore è la **viscosità** dei materiali, ovvero la resistenza che essi oppongono allo scorrimento. Nella nostra esperienza quotidiana la distinzione reologica è chiara, dato che i materiali liquidi fluiscono e quindi trasportano il calore per convezione e quelli solidi invece non sono in grado di fluire e trasportano il calore per conduzione. All'interno della Terra la situazione è più complessa a causa soprattutto delle elevate pressioni e temperature. Se sufficientemente caldi, i materiali solidi ad alta pressione si comportano in modo duttile, ovvero tendono a deformarsi e scorrere lentamente, tanto da poter trasferire il calore per convezione.

Il modello reologico richiede un'elaborazione più sofisticata dei dati ottenuti dalle indagini indirette e per questo motivo si è sviluppato più tardi ri-



◀ **Figura 22**
Esempio di celle convettive: sul fondo la fonte di calore scalda il fluido che tende a salire; raffreddandosi si sposta poi verso il basso.

petto al modello compositivo e presenta ancora oggi molti aspetti non chiari.

Le prime scoperte sulla reologia dei materiali terrestri riguardano la sua porzione più superficiale, fino a qualche centinaio di chilometri di profondità. Nel 1960 lo studio delle onde sismiche del terremoto più forte mai registrato dall'invenzione dei sismometri, avvenuto in Cile, portò alla scoperta dell'**astenosfera**. Essa è una porzione del mantello in cui le onde sismiche subiscono un'attenuazione che non può essere spiegata con variazioni composizionali. Si ritiene oggi che in questa fascia il mantello sia prevalentemente solido, ma contenga anche una piccola frazione di materiale fuso, variabile tra l'1 e il 10%. Questo, insieme alle elevate temperature, superiori ai 1300 °C, determina una reologia duttile che permette la presenza di celle convettive all'interno dell'astenosfera. La profondità della astenosfera è molto variabile e non facilmente definibile, anche perché le onde sismiche risultano molto attenuate sotto la crosta oceanica, ma sotto molte aree continentali risentono meno di questa attenuazione. Il limite superiore dell'astenosfera è posto tra i 180 e i 220 km di profondità, ma sotto la crosta oceanica esso può essere molto più vicino alla superficie. Il limite inferiore è posto da alcuni a circa 350-400 km di profondità, mentre altri estendono l'astenosfera fino attorno a 700 km di profondità. Questa incertezza si deve soprattutto alla forte eterogeneità laterale dell'astenosfera, che sotto le porzioni più antiche dei continenti sembra addirittura sparire.

In una corrispondenza ideale tra modello compositivo e reologico, l'astenosfera occupa una parte del mantello superiore, estendendosi secondo

CAPIRE LE PAROLE

Convezione deriva dal verbo latino *convehere*, che significa trasportare.

Conduzione si forma a partire dal verbo *condurre*, a sua volta derivante dal latino *conducere*, che ha il medesimo significato. Nell'accezione scientifica qui descritta prevale il significato di trasferimento, mentre nell'uso quotidiano indica perlopiù l'atto di guidare, concreto o metaforico: la «conduzione di un mezzo», «di un programma» o «di un'orchestra».



alcuni anche alla zona di transizione e alla sommità del mantello inferiore [► **Figura 23**].

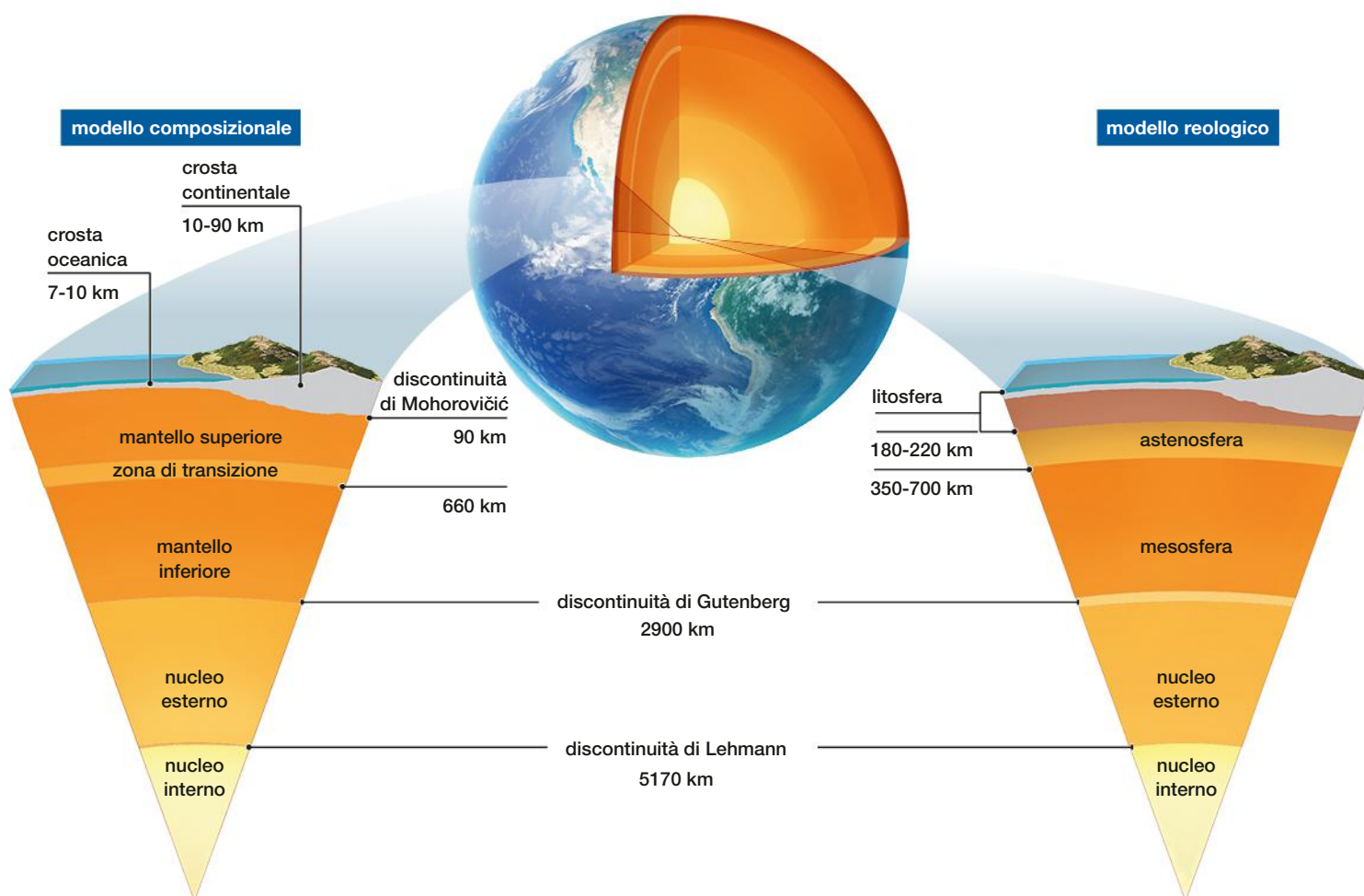
Sotto l'astenosfera è possibile individuare una zona denominata **mesosfera**. Essa si estende fino alla discontinuità di Gutenberg, che segna il confine con il nucleo a 2900 km di profondità. In questa porzione di Terra le rocce sono solide e hanno una densità che aumenta gradualmente come testimoniato dall'aumento delle velocità delle onde sismiche quando la attraversano.

Sopra l'astenosfera è presente la **litosfera**, che si estende fino alla superficie. Essa è caratterizzata da una reologia rigida, che non permette la formazione al suo interno di celle convettive. La litosfera è completamente solida, anche se occasionalmente è attraversata da materiale fuso, proveniente dall'astenosfera sottostante, o, in piccola parte, generato all'interno della litosfera stessa. Lo spessore della litosfera dipende dalla profondità a cui inizia l'astenosfera e varia da pochi chilometri fino a circa 180-220 km. In realtà sotto le porzioni più antiche dei continenti, dove l'astenosfera sembra quasi sparire, dato che l'attenuazione delle onde sismiche è minima o anche del tutto assente, lo spessore della litosfera risulta indefinito (in mancanza della astenosfe-

ra, la litosfera si salda al mantello subastenosferico e quindi non è più definibile). In un confronto con il modello compositivo la litosfera comprende tutta la crosta e la porzione più superficiale del mantello, che viene detta **mantello litosferico**.

Il modello reologico che comprende litosfera e astenosfera è stato fondamentale per lo sviluppo della teoria della tettonica delle placche, che studieremo in seguito. Oggi però l'importanza della distinzione tra litosfera e astenosfera è stata ridimensionata. Il perfezionamento delle tecniche di indagine indiretta, prima fra tutte la tomografia sismica, ha permesso di estendere il modello reologico alle porzioni più profonde del mantello e di scoprire che, contrariamente a quanto si credeva, i moti convettivi non sono limitati all'astenosfera, ma si estendono a tutto il mantello sublitosferico. Grazie anche allo sviluppo delle capacità di elaborazione dati, è oggi possibile eseguire una mappatura accurata delle temperature all'interno del mantello. Queste evidenziano la presenza di zone calde e fredde fortemente irregolari, che disegnano complicate geometrie di celle convettive. Le porzioni calde di queste celle sono state inizialmente interpretate come volumi cilindrici di materiale caldo in risali-

▼ **Figura 23**
Modello
compositivo e
modello reologico
della struttura interna
della Terra a confronto.

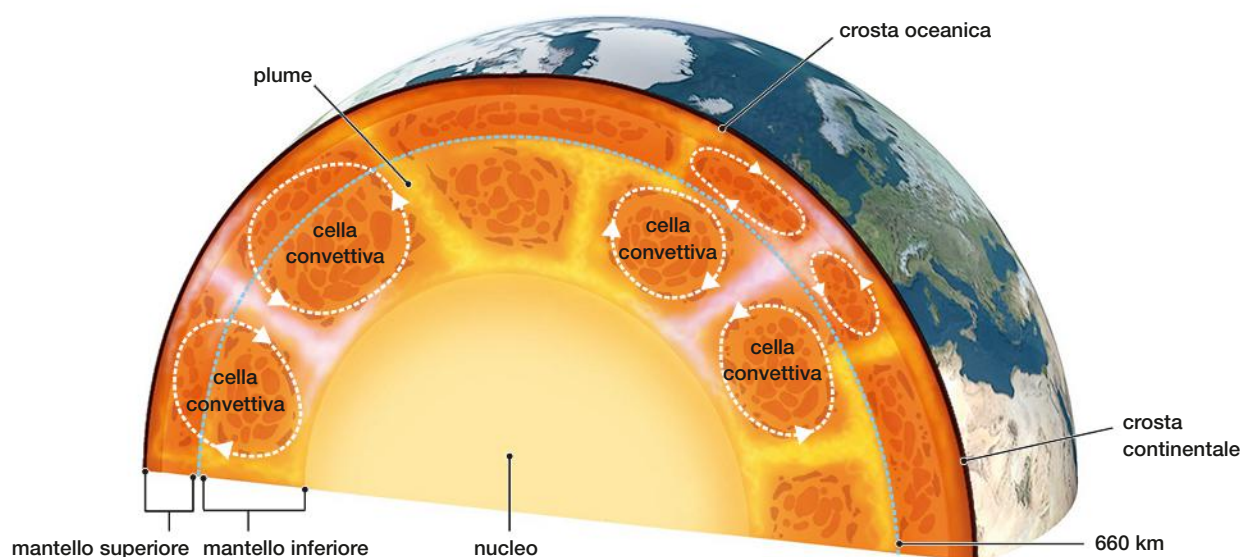


ta, detti **pennacchi** o, in inglese, **plume**, originatisi nella zona di contatto tra mantello e nucleo. Oggi si ritiene che esse rappresentino la parte ascendente di grandi celle convettive complesse che si estendono per tutto lo spessore del mantello [► **Figura 24**]. Questa complessa rete tridimensionale di celle convettive costituisce la modalità principale di trasferimento di calore nel mantello, che ricordiamo occupa l'84% del volume terrestre. Possiamo quindi affermare che la circolazione convettiva attraverso l'intero mantello è la modalità principale con cui la Terra si sta raffreddando. In questo quadro le celle convettive all'interno dell'astenosfera costituiscono solo una parte del più complesso sistema di celle convettive che coinvolge tutto il mantello.

Si sa ancora poco della reologia del nucleo, soprattutto del nucleo interno solido. Il nucleo ester-

no è invece certamente oggetto di intensi moti convettivi, che sono all'origine, come abbiamo visto, del campo magnetico terrestre.

Una delle maggiori sfide attuali delle scienze della Terra è la comprensione dei processi che avvengono nella zona di contatto tra nucleo esterno e mantello inferiore. Qui si trova la discontinuità di Gutenberg, la maggiore discontinuità presente all'interno della Terra, sia composizionale sia reologica. Quale è il legame tra le celle convettive nel nucleo esterno fuso e quelle nel mantello inferiore solido? Come avviene il trasferimento di calore dalle une alle altre? In quale modo questi processi trasferiscono calore fino alla superficie e quindi determinano tutta la dinamica del mantello e della crosta, fino ai suoi effetti ultimi in superficie? Queste domande hanno dato negli ultimi anni un nuovo impulso alle indagini sull'interno della Terra.



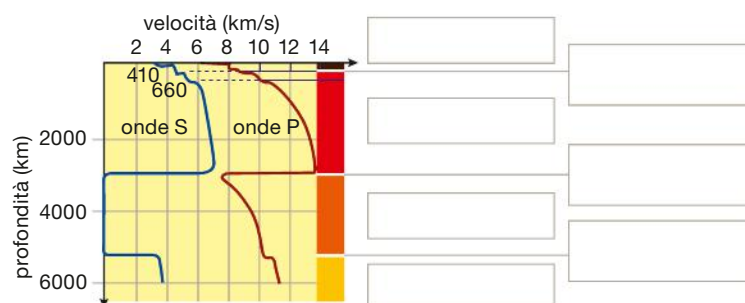
◀ **Figura 24**

All'interno del mantello sono presenti celle convettive molto complesse che favoriscono la risalita di materiale fuso attraverso plume diretti dal nucleo verso la superficie terrestre.

PRIMA DI PROSEGUIRE

1. Quali sono i modelli che spiegano la struttura interna della Terra?
2. Nel modello composizionale, come è descritto l'interno della Terra?
3. Qual è l'unica porzione della Terra indagabile attraverso perforazioni? Descrivila brevemente.
4. Che cosa si trova oltre i 2900 km di profondità?
5. Come viene trasportato il calore in materiali non fluidi?
6. **UN PO' DI CALCOLI** Nell'ipotesi che il nucleo occupi il 15% del volume terrestre, calcola il suo raggio.

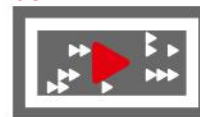
7. **LEGGI L'IMMAGINE** Osserva il grafico delle variazioni di velocità delle onde sismiche P e S con la profondità e inserisci i nomi delle parti interne della Terra e delle discontinuità.





VERIFICA LE TUE CONOSCENZE

GUARDA!

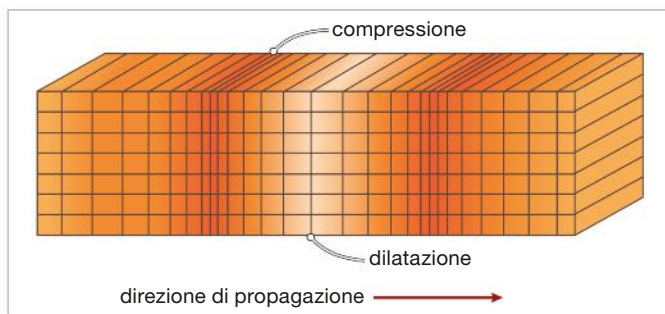


Ripassa

Altri esercizi
online su ZTE

Scegli la risposta corretta.

- Quali metodi di indagine diretta si utilizzano per studiare l'interno della Terra?
 - Indagini sismiche.
 - Analisi del flusso di calore.
 - Analisi della variazione della temperatura dell'interno della Terra.
 - Esplorazioni minerarie, sondaggi e analisi dei materiali portati in superficie dai movimenti tettonici.
- Le perforazioni dirette più recenti quanti chilometri di profondità raggiungono?
 - 10 km.
 - 15 km.
 - 12 km.
 - 20 km.
- Come si chiamano i corpi estranei all'interno di rocce magmatiche portate in superficie?
 - Litosfere.
 - Calcarei.
 - Xenoliti.
 - Magnetiti.
- Che cosa si intende per gradiente geotermico?
 - Si tratta dell'aumento della temperatura con l'altezza.
 - Si tratta dell'aumento della profondità con la temperatura.
 - Si tratta dell'aumento della temperatura con la profondità.
 - Si tratta dell'aumento del calore con la profondità.
- Di che tipo sono le onde sismiche?
 - Sonore.
 - Meccaniche.
 - Termiche.
 - Elettromagnetiche.
- Quale differenza fondamentale esiste tra le onde P e le onde S?
 - Le prime sono onde longitudinali e le seconde trasversali.
 - Le prime sono trasversali e le seconde longitudinali.
 - Le prime sono onde superficiali e le seconde profonde.
 - Le prime sono onde verticali e le seconde orizzontali.
- Che cosa rappresenta l'immagine?



- La propagazione delle onde S.
- La propagazione delle onde P.
- La propagazione delle onde S e P.
- La propagazione delle onde superficiali.

- Come si chiama la discontinuità che separa il mantello dal nucleo?
 - Conrad.
 - Gutenberg.
 - Lehmann.
 - Mohorovičić.
- Su quali dati si basa il modello composizionale?
 - Quelli forniti dallo studio dei vulcani.
 - Quelli forniti dallo studio delle onde sismiche.
 - Quelli forniti dallo studio delle rocce.
 - Quelli forniti dallo studio del flusso di calore.
- Come varia la profondità della Moho?
 - Da circa 5 a circa 40 km.
 - Oltre 60 km.
 - Da circa 5 a oltre 60 km.
 - Da circa 40 a oltre 60 km.
- Che cosa separa la Moho?
 - Crosta e nucleo.
 - Crosta e mantello.
 - Mantello superiore e mantello inferiore.
 - Nucleo interno e nucleo esterno.
- Quale tipo di onde utilizza la tomografia sismica?
 - Tutti i tipi di onde.
 - Le onde superficiali.
 - Le onde S.
 - Le onde P.
- Quali parametri definiscono il campo magnetico terrestre?
 - Intensità, direzione e verso.
 - Intensità, inclinazione e direzione.
 - Intensità, declinazione e verso.
 - Intensità, direzione e polarità.
- Qual è l'origine del campo magnetico terrestre?
 - Magnete naturale permanente.
 - Dinamo autoeccitante.
 - Barra magnetica.
 - Campo solare.
- Qual è la differenza tra crosta oceanica e crosta continentale?
 - La crosta oceanica è più spessa della crosta continentale.
 - La crosta oceanica è meno densa della crosta continentale.
 - La crosta oceanica presenta differenze di altitudini maggiori rispetto alla crosta continentale.
 - Le rocce che compongono la crosta oceanica sono meno uniformi e più deformate rispetto a quelle della crosta continentale.
- Come si chiama la porzione della Terra caratterizzata da comportamento rigido, formata dalla crosta e da parte del mantello superiore?
 - Litosfera.
 - Magnetosfera.
 - Astenosfera.
 - Zona di transizione.
- Che cosa prevede il modello reologico?
 - La Terra è divisa in crosta, mantello e nucleo.
 - La Terra è divisa in litosfera, astenosfera, mesosfera, nucleo esterno e nucleo interno.
 - L'interno della Terra è suddiviso in base alla composizione chimica dei materiali che lo costituiscono.
 - La Terra è divisa in crosta, astenosfera, nucleo esterno e nucleo interno.

18. Quali movimenti avvengono nel nucleo esterno?

- ☐ a Convettivi.
- ☐ b Elettrici.
- ☐ c Lineari.
- ☐ d Circolari.

Scegli la risposta corretta e rispondi alla domanda.

19. Quanto vale il flusso di calore che proviene dall'interno della Terra rispetto a quello che colpisce la superficie per irraggiamento solare?

- ☐ a È circa 5000 volte inferiore.
- ☐ b È circa 5000 volte superiore.
- ☐ c È circa uguale.
- ☐ d Può essere superiore o inferiore dato che è fortemente variabile.

In quale modo si genera tale flusso di calore?

Completa i brani.

20. La densità superficiale media della Terra corrisponde a, mentre la densità media del nostro pianeta è di Ciò significa che spostandosi verso le zone si trovano via via minerali e rocce differenti rispetto a quelli in Anche la pressione da carico, ossia dovuta al dei materiali sovrastanti, andando dalla superficie verso l'interno, anche se non in maniera

21. La sismica permette di studiare l'..... della Terra. Dai prodotti dai sismografi si ricostruiscono i tragitti delle onde, onde di pressione, e delle onde, onde trasversali. Per studiare le caratteristiche di una zona non profonda si utilizzano le onde sismiche, di cui si conosce il momento dell'....., l'..... e la della fonte di energia.

22. Collega i termini della colonna di sinistra con le definizioni della colonna di destra.

- | | |
|---|--|
| 1. Il Polo nord magnetico | a. si evidenzia in geodesia |
| 2. Lo schiacciamento polare della Terra | b. si sta muovendo verso la Siberia |
| 3. Il flusso di calore | c. si utilizzano per la tomografia sismica |
| 4. Le onde superficiali | d. varia con la profondità all'interno della Terra |
| 5. Le onde S | e. si producono per oscillazioni ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda |

Rispondi alle seguenti domande in massimo quattro righe.

- 23. Quali sono le caratteristiche del campo magnetico terrestre?
- 24. Come si ricava la densità media della Terra?
- 25. Come si spiega l'origine del calore terrestre?
- 26. Come si registrano le onde sismiche?
- 27. Dove si trovano le discontinuità di Moho e Gutenberg e che cosa accade in loro corrispondenza?

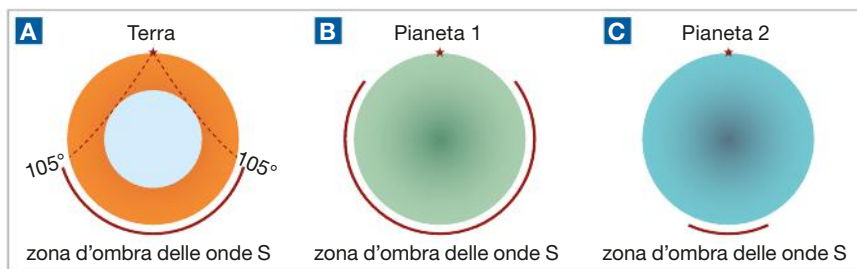
METTI ALLA PROVA LE TUE COMPETENZE

Analizzare immagini

28. Osserva l'immagine e rispondi alle domande.

- a. Che cos'è la zona d'ombra?
- b. Come si interpreta la zona d'ombra delle onde S?

Nelle figure B e C è rappresentata la zona d'ombra delle onde S di due ipotetici pianeti. Completa la figura tracciando il possibile tragitto delle onde S e la superficie del nucleo.



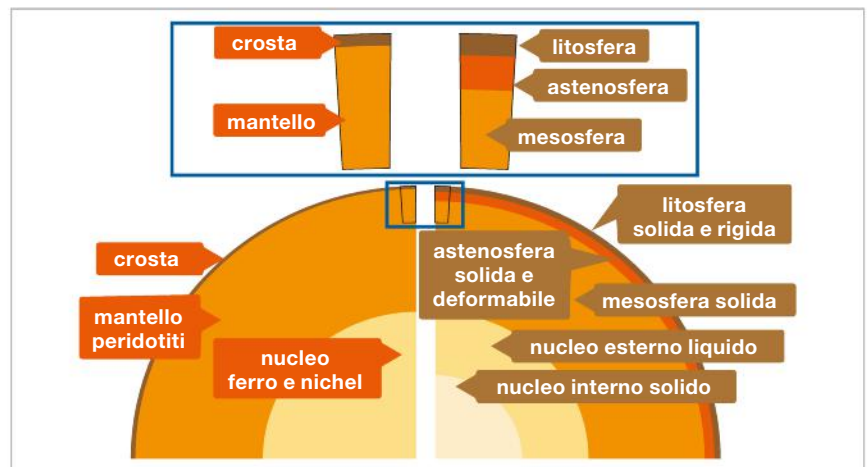
29. Osserva l'immagine e rispondi alle domande.

- a. Che cosa rappresenta?
- b. Che cosa puoi osservare?
- c. Potrebbe accadere che la bussola un giorno non indichi più il nord ma il sud geografico?

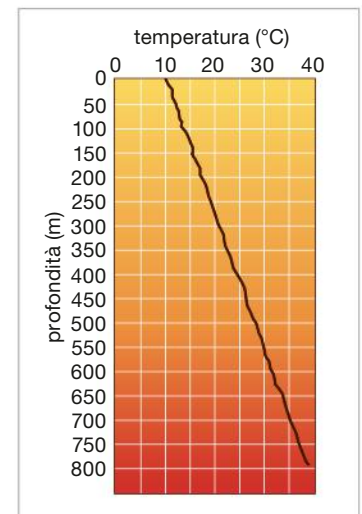




30. Osserva l'immagine che mette a confronto due modelli dell'interno della Terra.
- Di quali modelli si tratta?
 - Su che cosa si basano i due modelli?
 - Nel confronto tra i due modelli perché la litosfera ha uno spessore maggiore rispetto alla crosta?



31. Osserva l'immagine che mostra l'aumento della temperatura della Terra con la profondità nei primi 800 m e rispondi alle domande.
- Come si chiama tale aumento?
 - Quant'è, in °C/m, la variazione media di temperatura tra la superficie e i primi 800 m di profondità?
 - Per grado geotermico si intende la profondità alla quale bisogna scendere perché si verifichi l'aumento di un grado di temperatura. In un'approssimazione lineare del grafico, quanto vale il grado geotermico?
 - Sapendo che nel nucleo interno della Terra la temperatura è di circa 4000 °C, l'aumento della temperatura con la profondità rimane costante per tutto lo spessore del raggio terrestre? Perché?



GUARDA!



Interactive
Summing-up



In English

Choose the correct answer.

32. In which layer do S waves not propagate?
- Internal core.
 - External core.
 - Mantle.
 - Crust.
33. What kind of waves are P waves?
- Cutting.
 - Transversal.
 - Longitudinal.
 - Surface.
34. At what depth is the Moho?
- 1% of the Earth's radius.
 - 10% of the Earth's radius.
 - 20% of the Earth's radius.
 - 50% of the Earth's radius.
35. What is a discontinuity?
- A surface that separates one layer of our planet from the other.
 - A surface within the Earth at which seismic wave velocities change.
 - A band that separates the Earth from another element of the Solar System.
 - A line that marks a change in physical or chemical characteristics in a rock mass.

Read and answer.

36. Read the following passage about seismic waves and answer.
- Seismic waves: vibrations generated by an earthquake, explosion, or similar energetic source and propagated within the Earth or along its surface. Earthquakes generate different types of elastic waves: body waves, which travel within the Earth, and surface waves, which travel along its surface. Seismographs record the amplitude and frequency of seismic waves and yield information about the Earth and its subsurface structure. Artificially generated seismic waves recorded during seismic surveys are used to collect data in oil and gas prospecting and engineering. Of the body waves, the primary, or *P*, wave has the higher speed of propagation and so reaches a seismic recording station faster than the secondary, or *S*, wave. *P* waves, also called compressional or longitudinal waves, give the transmitting medium – whether liquid, solid, or gas – a back-and-forth motion in the direction of the path of propagation, thus stretching or compressing the medium as the wave passes any one point in a manner similar to that of sound waves in air.

Adapted from the *Encyclopaedia Britannica*

- What causes seismic waves?
- Which instrument records seismic waves?
- Which seismic waves have the higher speed?
- Why, how and where are P waves propagated?