



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

La struttura interna della Terra

Per comprendere i **processi petrogenetici** (che determinano la formazione delle rocce) è innanzitutto necessario capire quali siano:

- i **sistemi chimici disponibili** (da che cosa?)

- i **contesti geologici** (dove?)

entro i quali le rocce possono formarsi



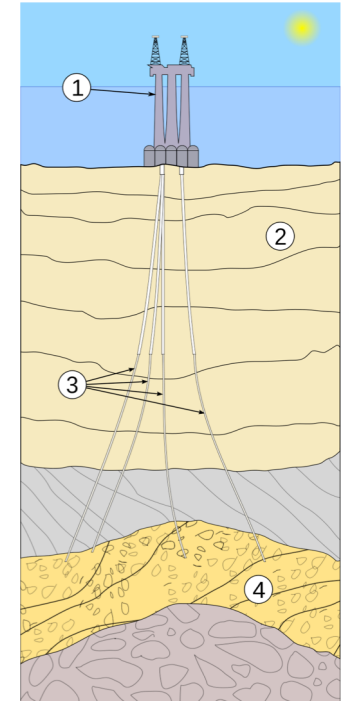
La struttura interna della Terra: studio dell'inaccessibile

Composizione e stati interni della Terra **non possono essere conosciuti mediante osservazioni dirette:**

Perforazioni petrolifere: comunemente 6-7 km scientifica
massima profondità circa 13 km

Strutture particolari: finestre tettoniche e penepianizzazione
poche decine di Km (max 60-100 km)

Magmi: materiale profondo eruttato dall'attività magmatica
si forma a profondità max 100-200 km e
può portare in superficie frammenti di xenoliti
(zona sorgente)



Si ricorre quindi a **metodi indiretti**:

- 1) la **densità media terrestre** pari a **5,517 g/cm³** contro una densità media delle **rocce superficiali** di **2,75 g/cm³**;

- 2) la costante di precessione degli equinozi che consente di calcolare il momento di inerzia dal quale si traggono importanti deduzioni sulla distribuzione delle densità in seno al globo terrestre;

- 3) i **dati sismici** indicano la presenza di **discontinuità entro la Terra** e forniscono indicazioni sulla costante elastica dei materiali coinvolti.
 - Onde sismiche naturali (terremoti)
 - Onde fisiche artificiali

Sistemi chimici disponibili

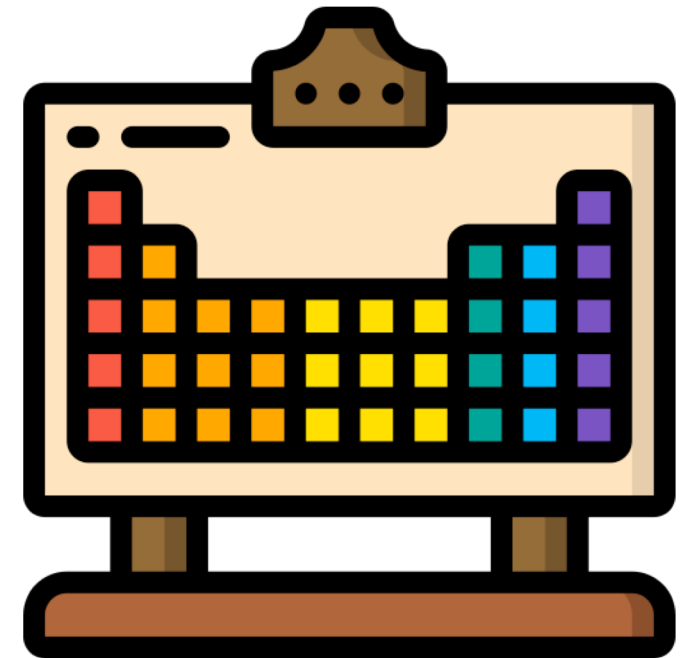
Pianeta Terra → composizione **globale**

| | MASON,1966 (wt%) | RINGWOOD,1966 (condriti) (wt%) |
|-----------|---------------------|-----------------------------------|
| O | 30 | 30 |
| Fe | 35 | 31 |
| Si | 15 | 18 |
| Mg | 13 | 16 |
| S | 1.9 | – |
| Ni | 2.4 | 1.7 |
| Ca | 1.1 | 1.8 |
| Al | 1.1 | 1.4 |

Na, Cr, Mn: < 1%

P, Co, K, Ti: < 0,1%

Somma di tutti gli
altri elementi ≤ 0.1 .



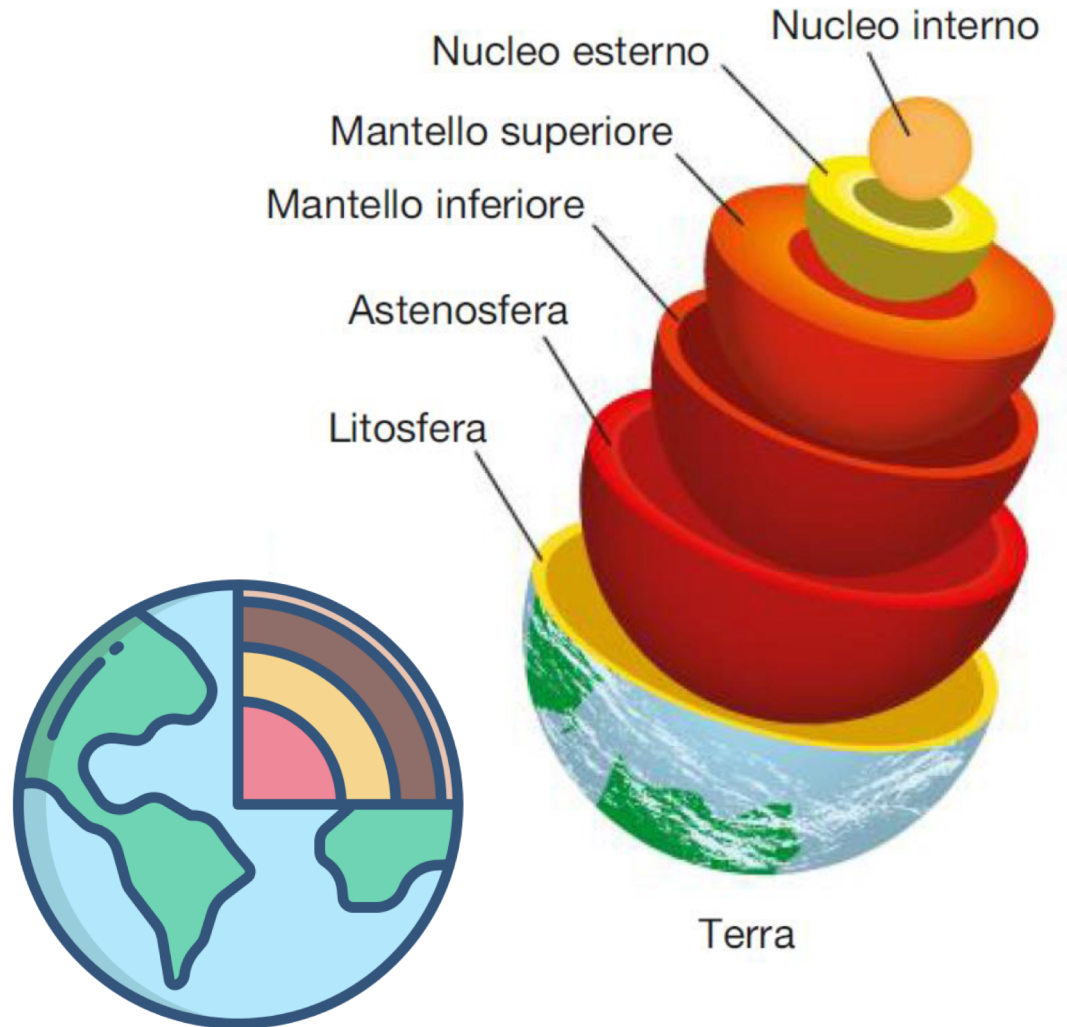
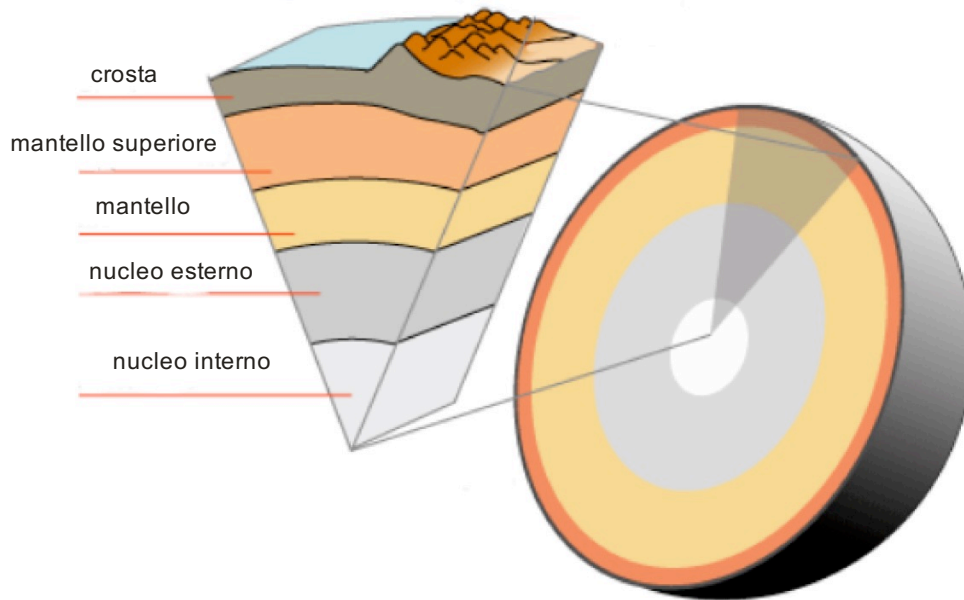
Le stime più recenti non modificano la sostanza del quadro soprastante.

Ma la **distribuzione** dei materiali all'interno della terra **non è omogenea**

- DENSITÀ: rocce superficiali 2.8 g/cm^3
(densità media delle rocce)
- pianeta Terra 5.517 g/cm^3
(calcoli astronomico-gravitazionali)

→ materiali **pesanti** in **profondità**

→ materiali **leggeri** nelle **parti più esterne**



La propagazione delle onde sismiche

Quando avviene un terremoto nell'interno della Terra, una parte dell'energia accumulata è liberata sotto forma di onde elastiche che si propagano all'interno della terra.

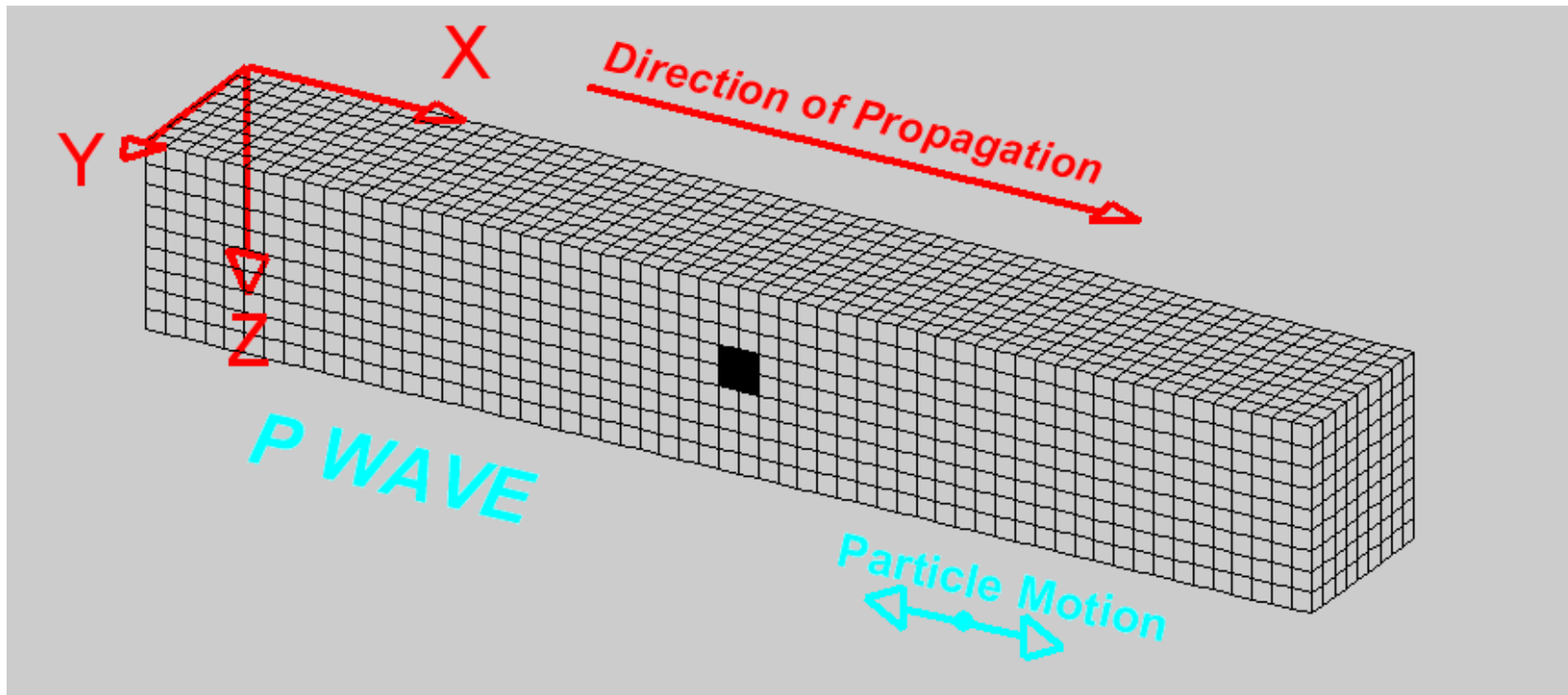
Queste onde possono essere rivelate da appositi strumenti detti sismometri. Vi sono due tipi principali di onde: le onde di volume e quelle superficiali:

- onde di volume
 - longitudinali (P)
 - trasversali (S)
- onde di superficie
 - Love
 - Rayleigh

Onde longitudinali (P)

Si propagano mediante oscillazioni delle particelle che costituiscono il mezzo attraversato *nella stessa direzione della propagazione dell'onda*;

⇒ sforzi di compressione e dilatazione;

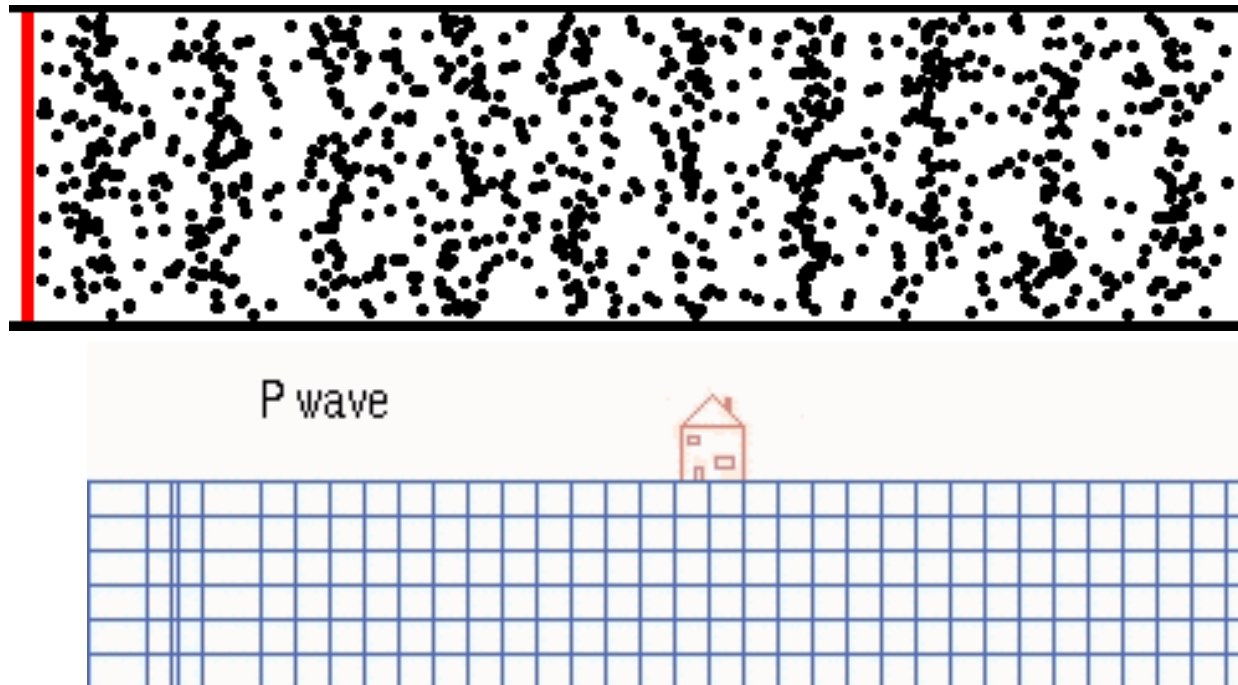


$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

K = modulo di incompressibilità
 μ = modulo di rigidità
 ρ = densità

$$V = 5.5\text{--}11.7 \text{ km s}^{-1}$$

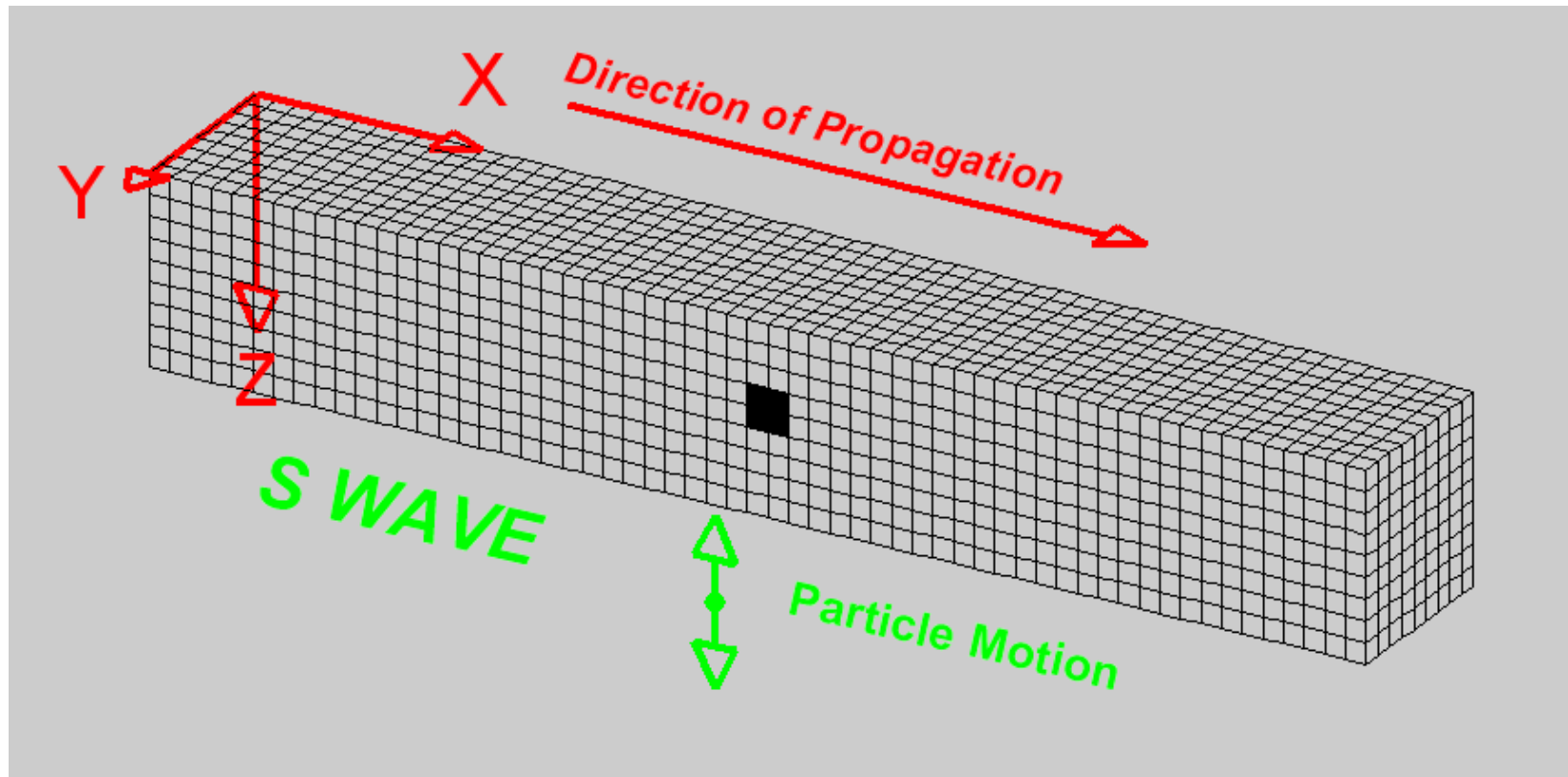
Simili a onde sonore, si propagano in solidi e fluidi



Onde trasversali (S)

Si propagano mediante oscillazioni delle particelle del mezzo perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda.

⇒ sforzi di taglio



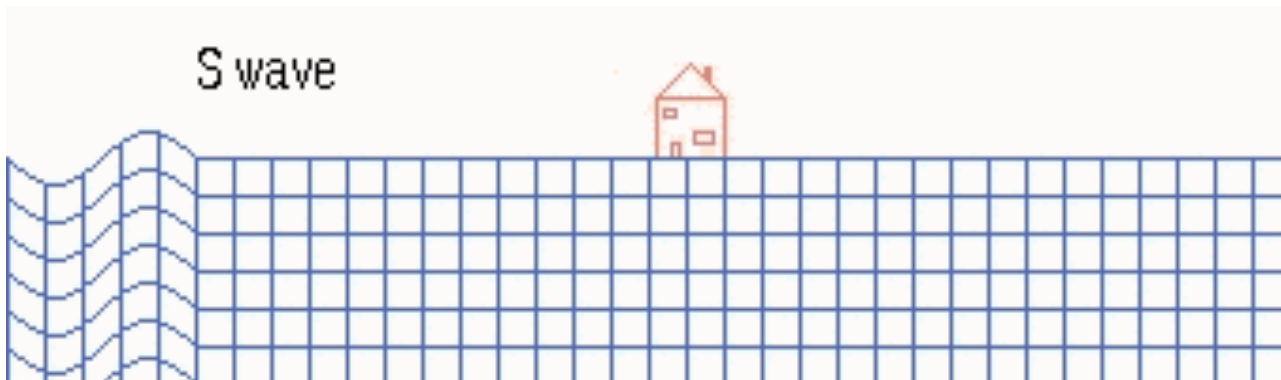
$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

μ = modulo di rigidità; ρ = densità

$\mu = 0$ nei liquidi \rightarrow non si propagano nei liquidi

*rallentamento di V_s al diminuire di μ : nei mezzi poco rigidi.

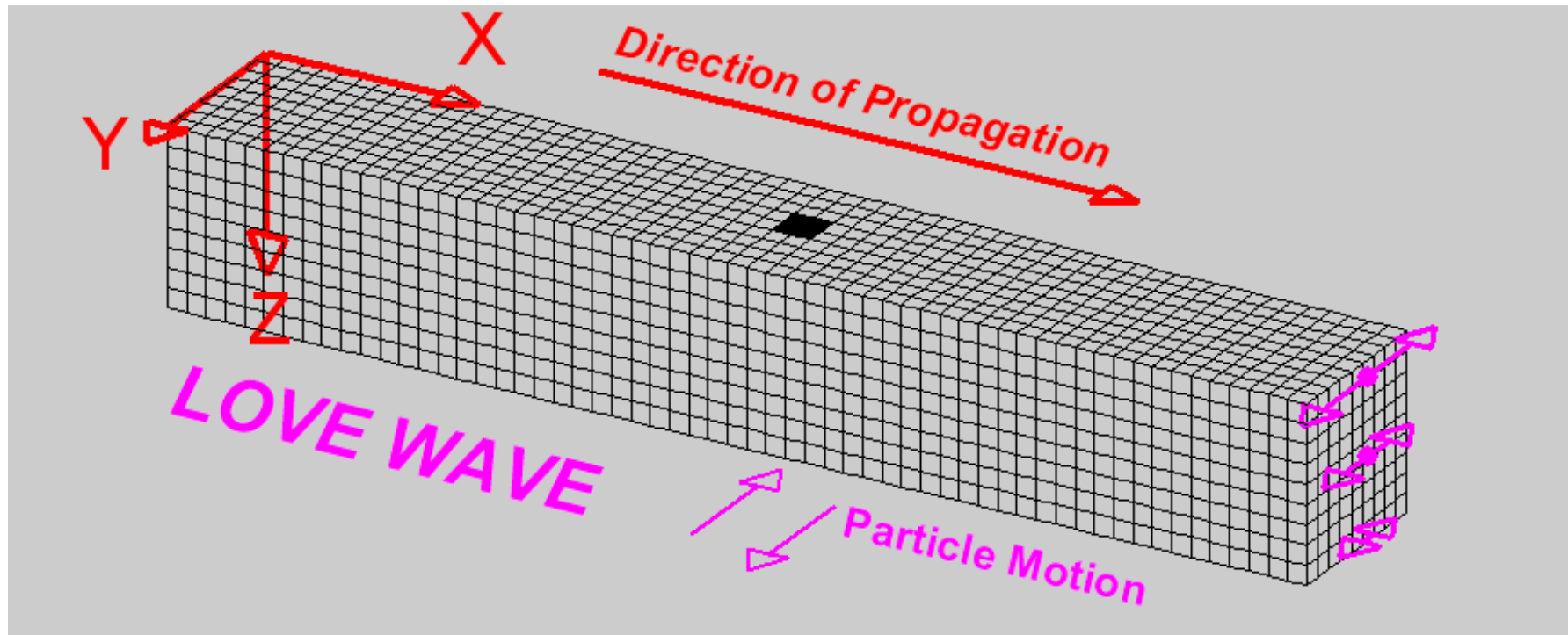
* $V_p > V_s$ $V_p/V_s \sim \sqrt{3}$



Onde di Love (onde di superficie)

Si generano da una discontinuità tra due strati quando la V_s nello strato inferiore è maggiore della V_s nello strato superiore.

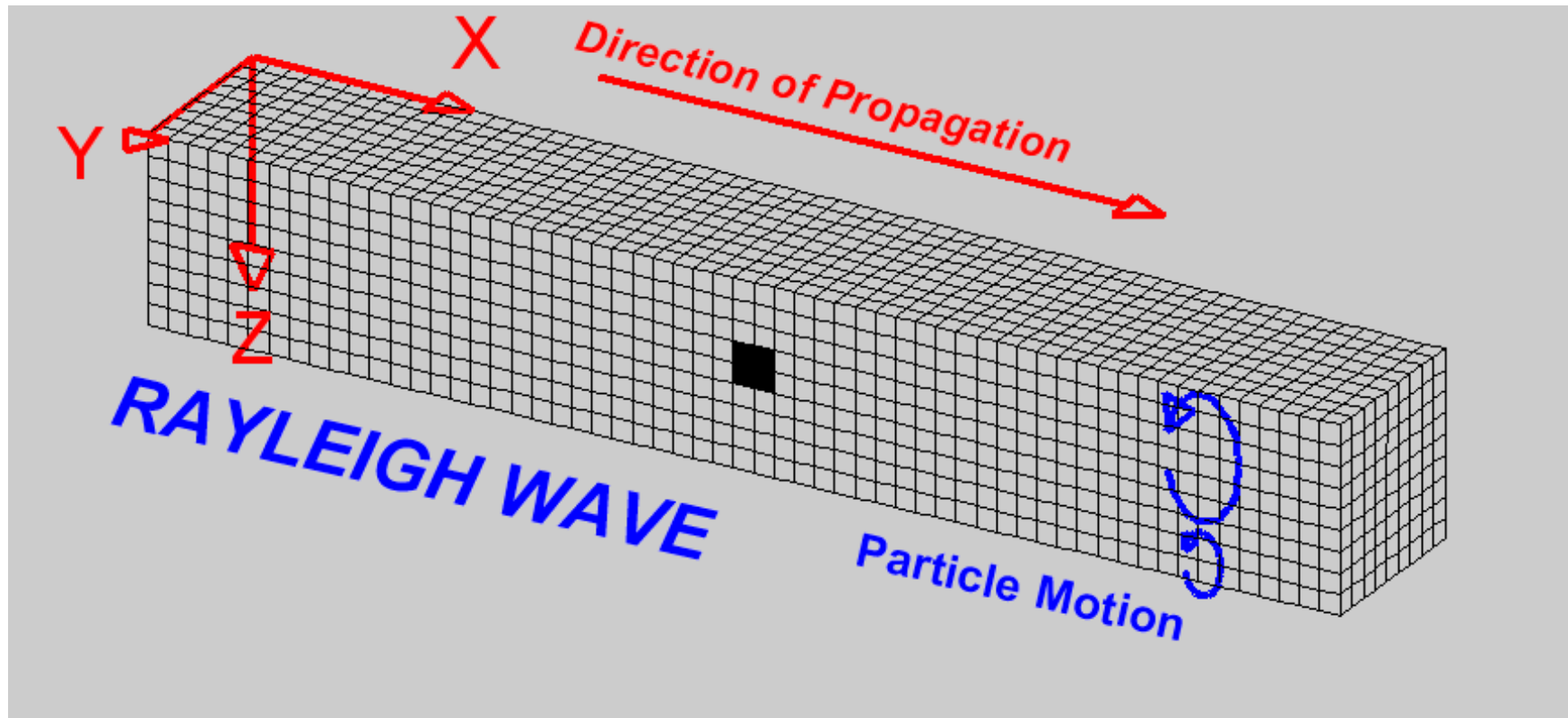
Il movimento è orizzontale, perpendicolare alla direzione di propagazione. L'ampiezza diminuisce con la profondità



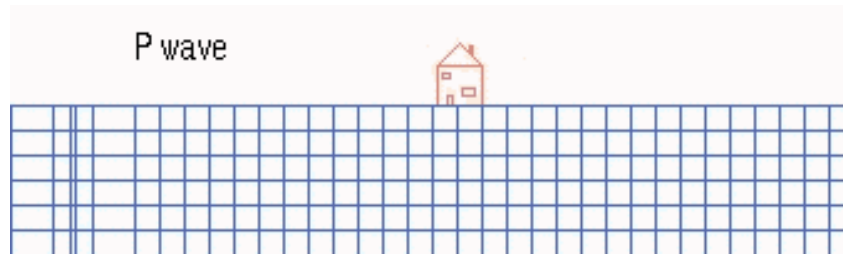
Onde di Rayleigh (onde di superficie)

L'ampiezza diminuisce con la profondità; il movimento è assimilabile ad un'ellisse retrograda

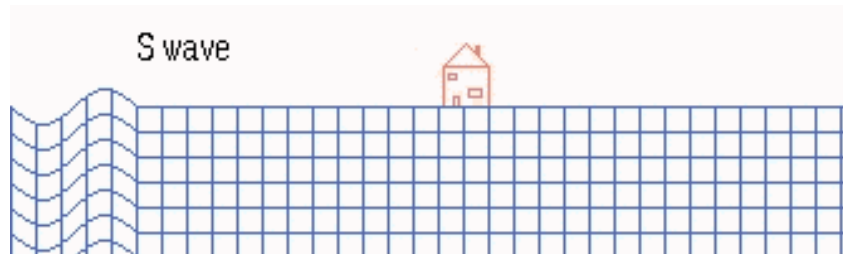
Meno veloci delle Love



P wave



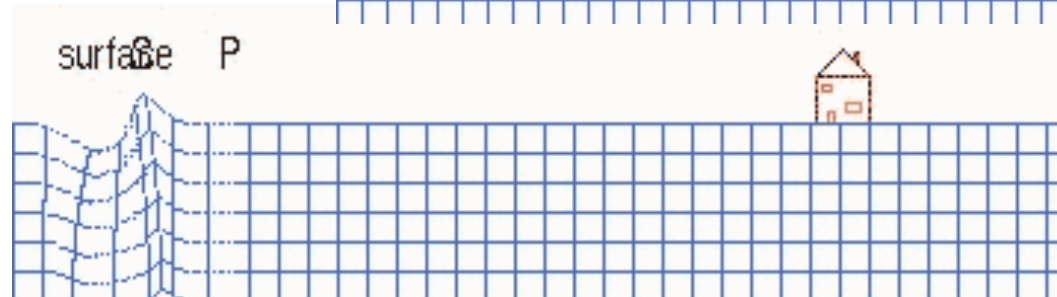
S wave



Surface wave

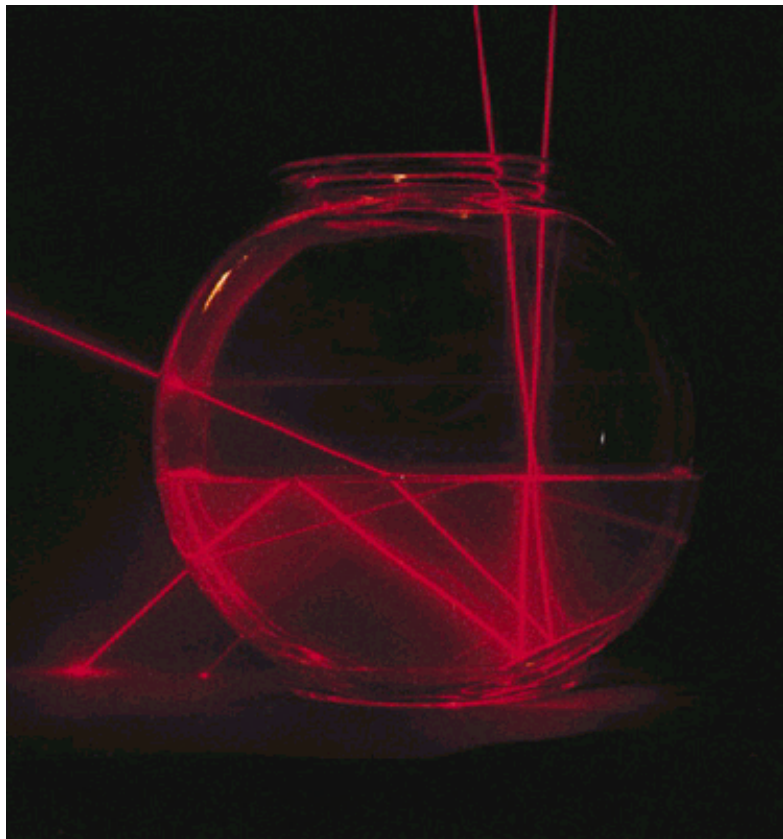


surface P



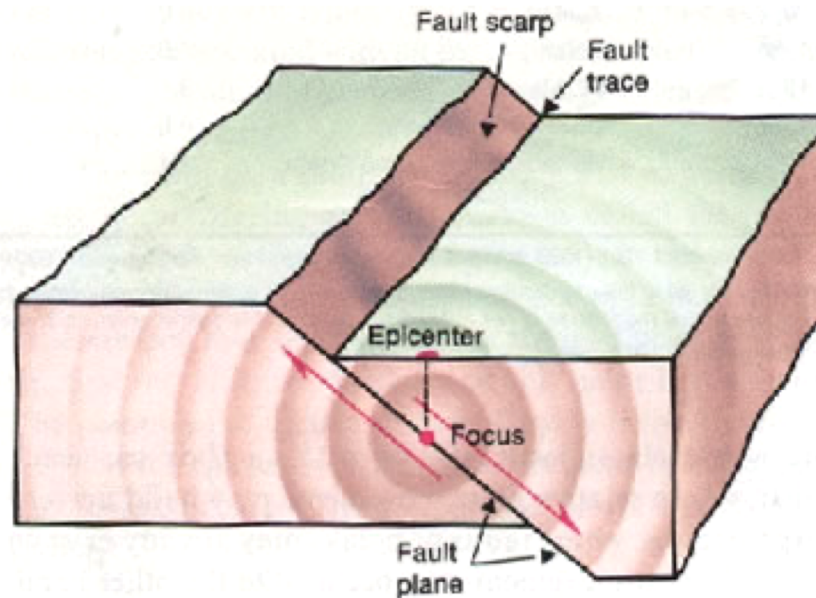
Riflessione e rifrazione

Quando le onde sismiche si propagano in strati costituiti da rocce diverse esse si riflettono e/o rifrangono alla superficie di contatto.



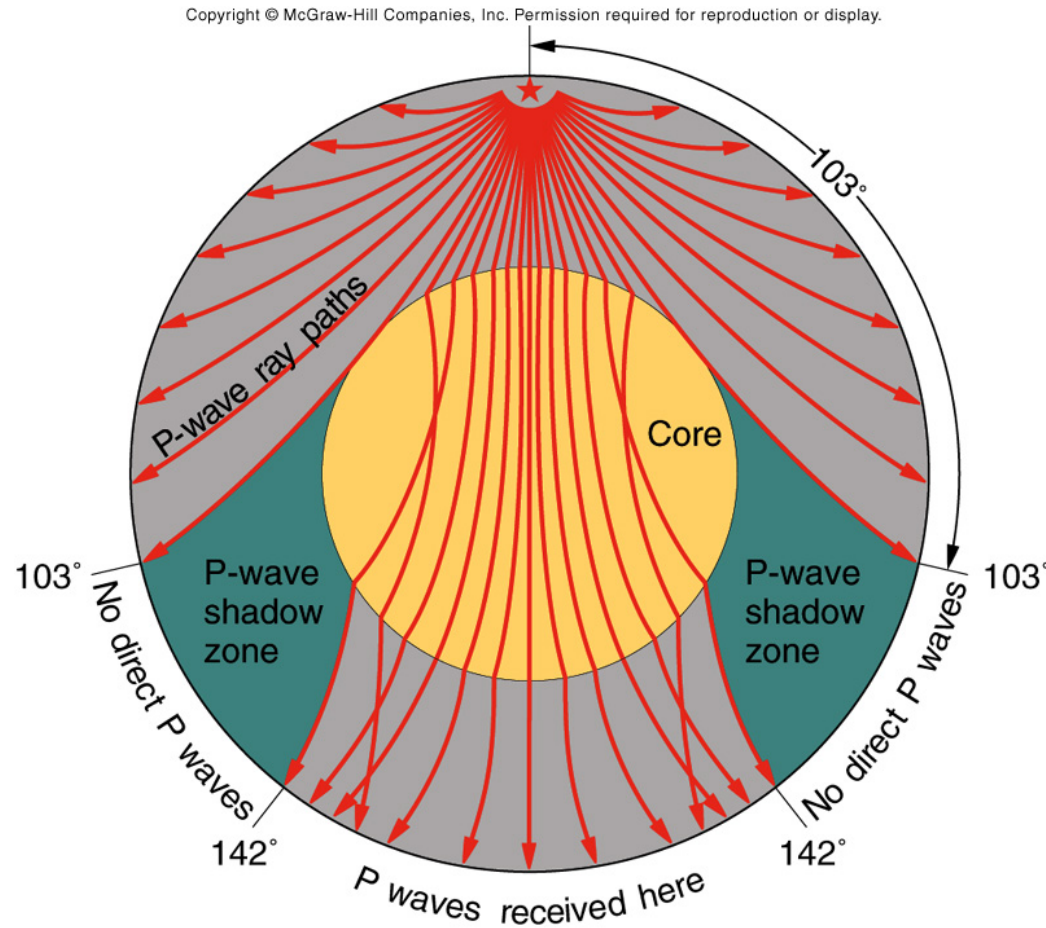
La direzione di propagazione cambia in funzione della velocità e delle proprietà petrofisiche delle rocce.

Pertanto i tempi di arrivo delle onde sismiche (ad un certo punto di riferimento) dipendono dalle caratteristiche elastiche del mezzo attraversato.



Il terremoto è causato dall'accumulo di deformazione dovuto allo sforzo tettonico applicato. Quando lo sforzo applicato supera la soglia critica di frattura del materiale, si ha il cedimento della roccia che comincia ad oscillare elasticamente al momento della rottura (Rebound Elastico).

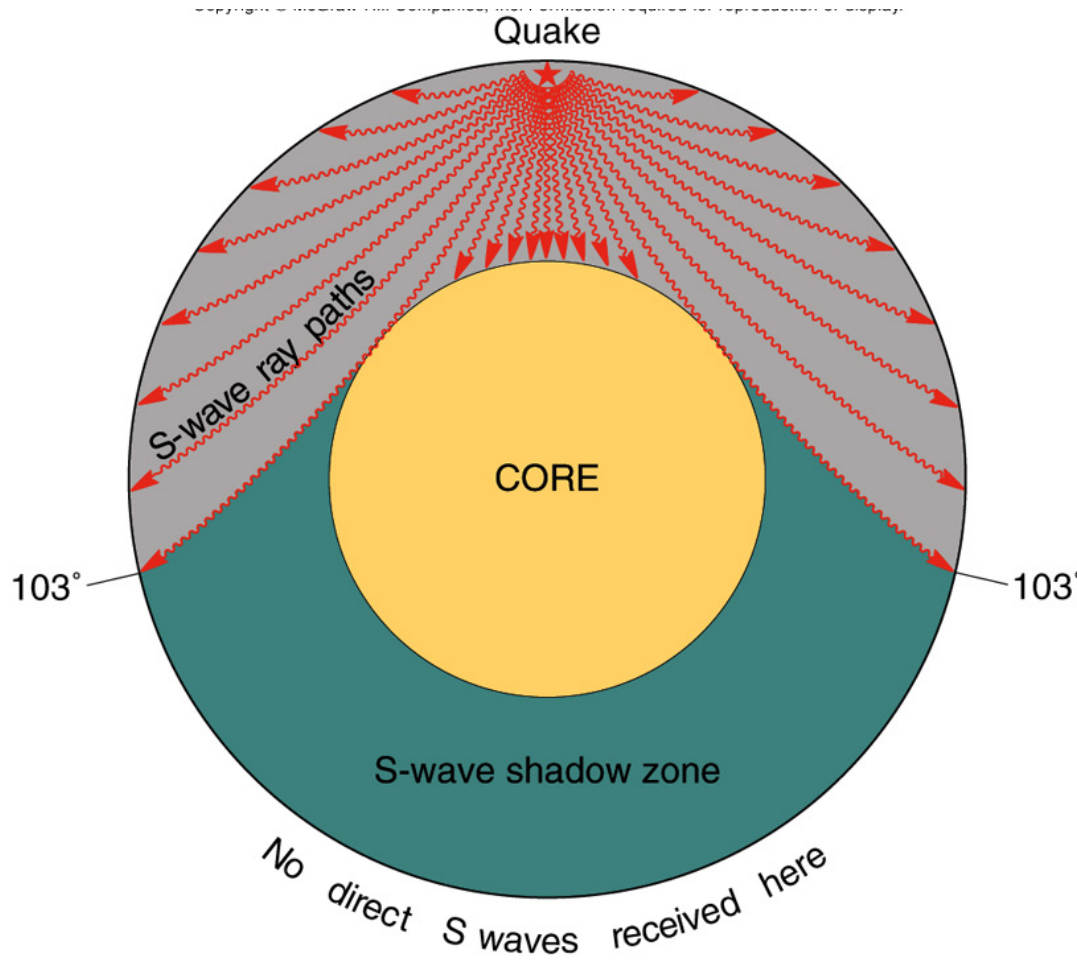
Zona d'ombra delle onde P



La riflessione delle onde P viene usata per **dedurre al struttura della Terra**

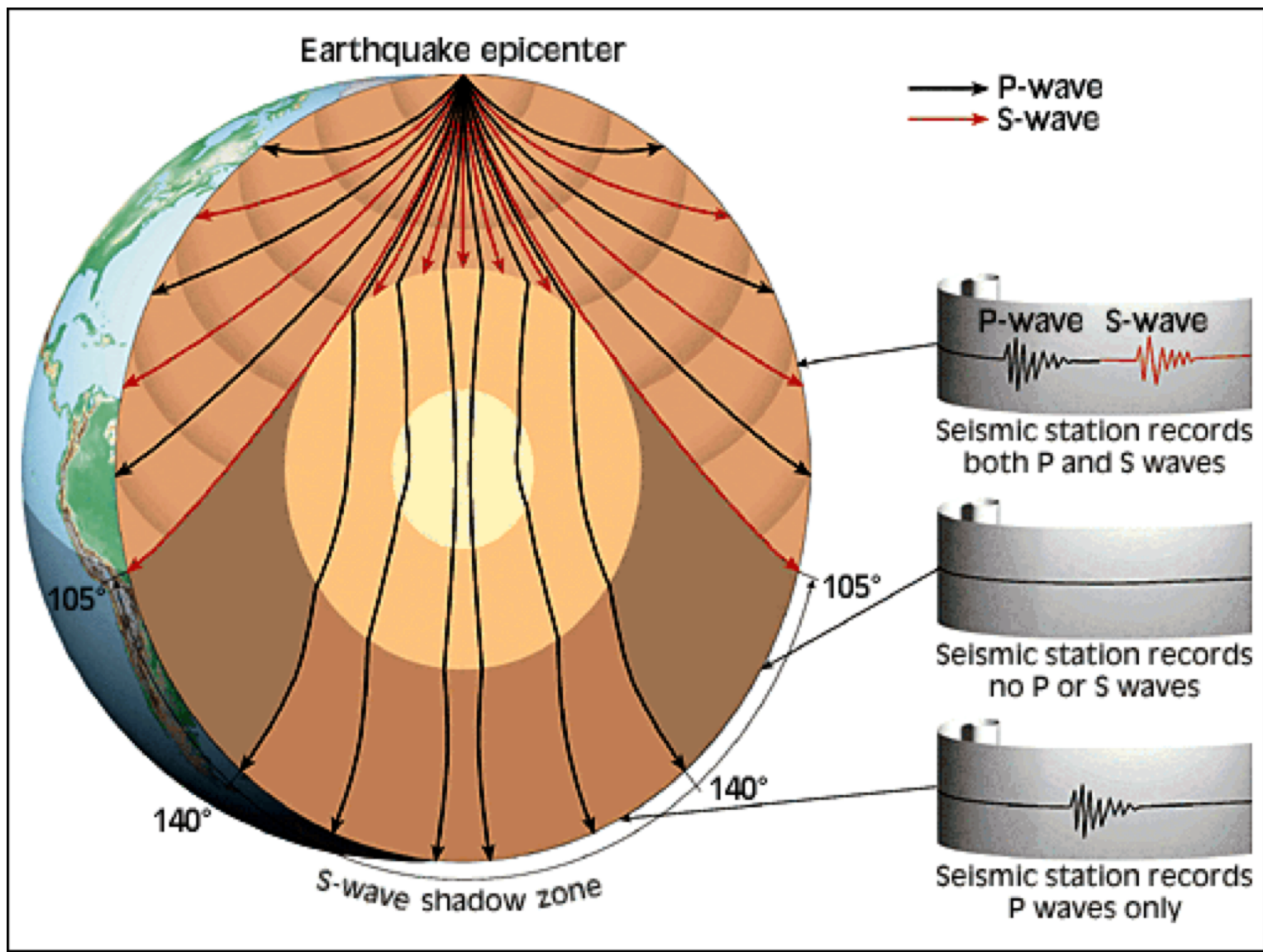
Intorno a 2900 km la velocità delle onde P diminuisce (zona d'ombra)

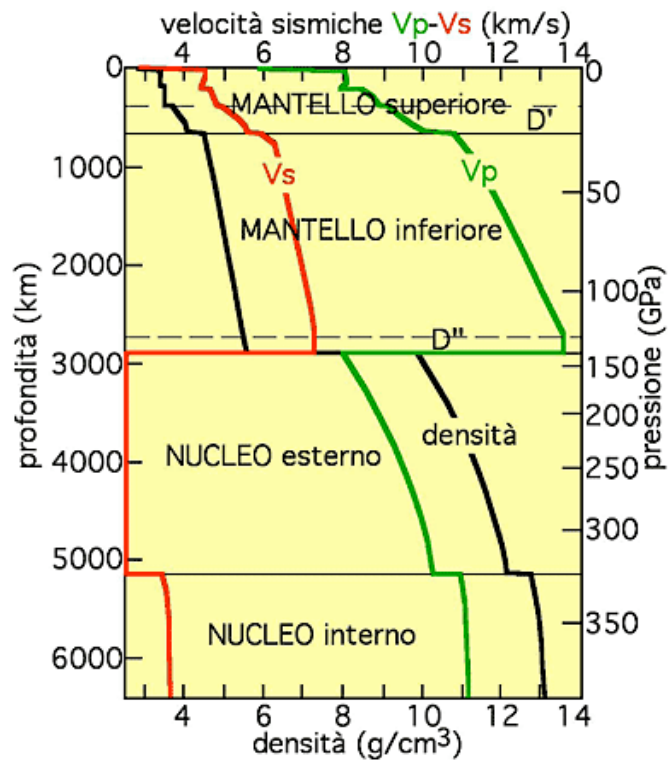
Zona d'ombra delle onde S



La riflessione delle onde S viene usata per dedurre la struttura della Terra

La zona d'ombra delle onde S indica un **limite solido-liquido** intorno a **2900 km**





Discontinuità di Mohorovičić

Discontinuità di Gutenberg

Discontinuità di Lehmann

Fino a 30-50 Km: 2.7 -3.3 g/cm³

Da 30-50 a circa 2990 Km: 3.3 - 5.7g/cm³

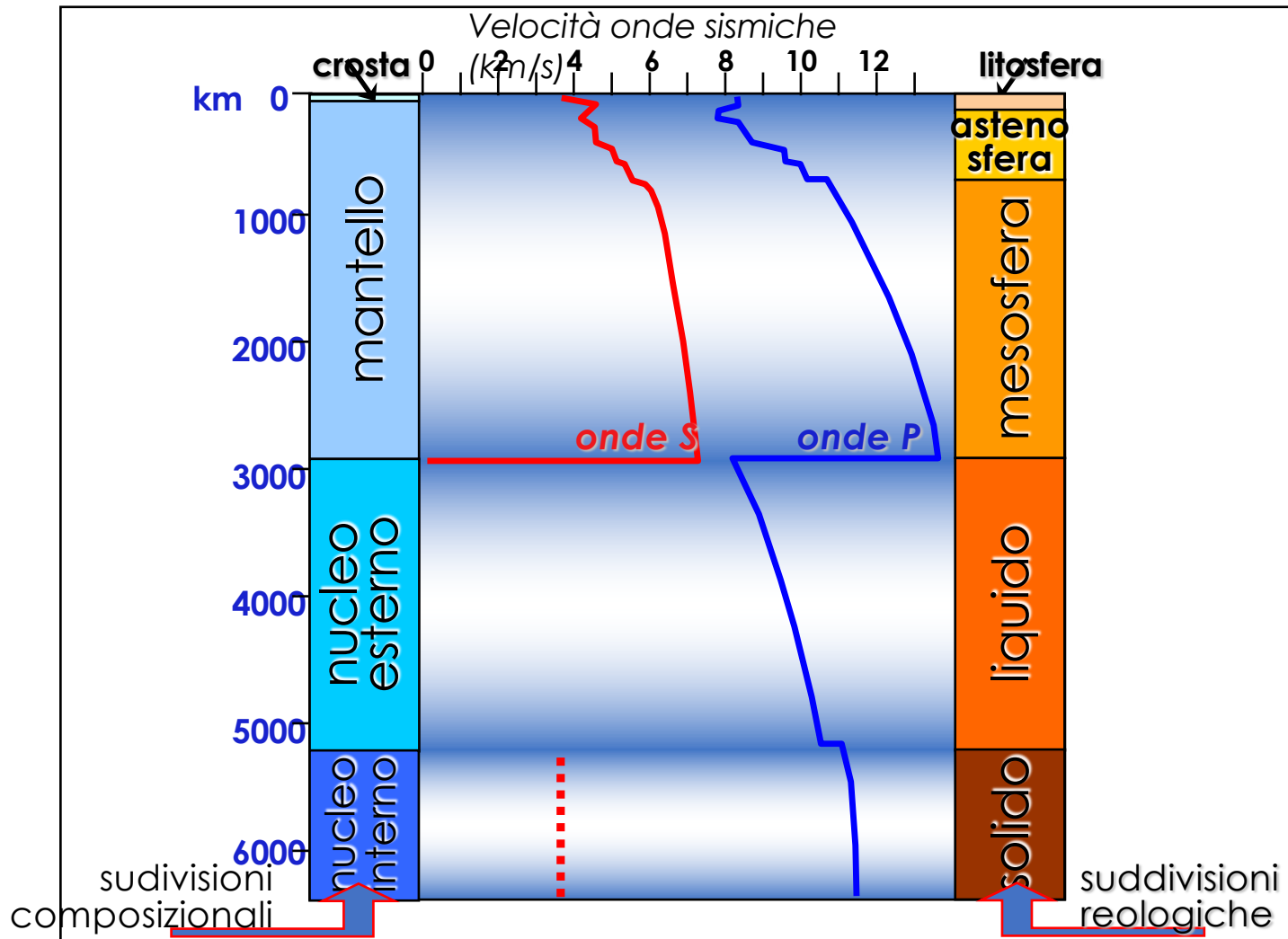
Da 2990 a 5155 Km (**liquido**): 9.9 - 12.2 g/cm³

Da 5155 Km a 6371 (**solido**): 12.6 to 13.0 g/cm³



Densità aumenta con la profondità

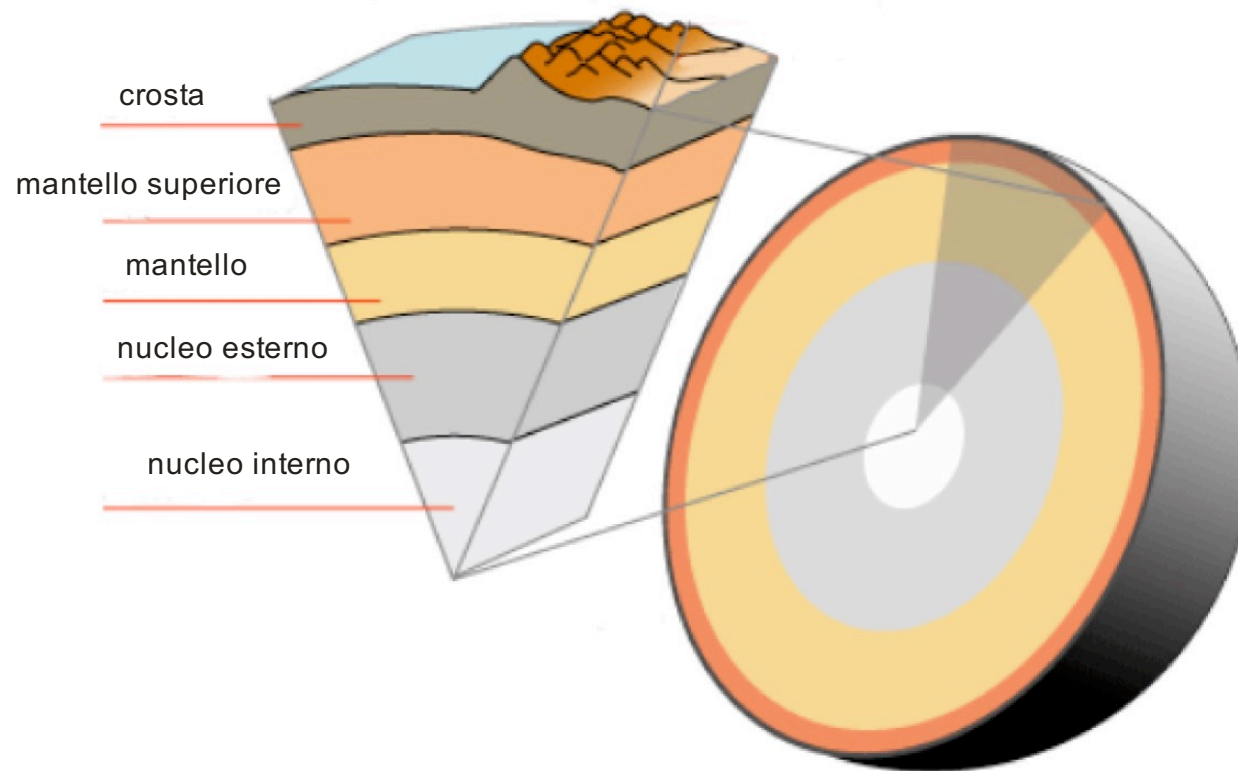
Onde sismiche all'interno della Terra

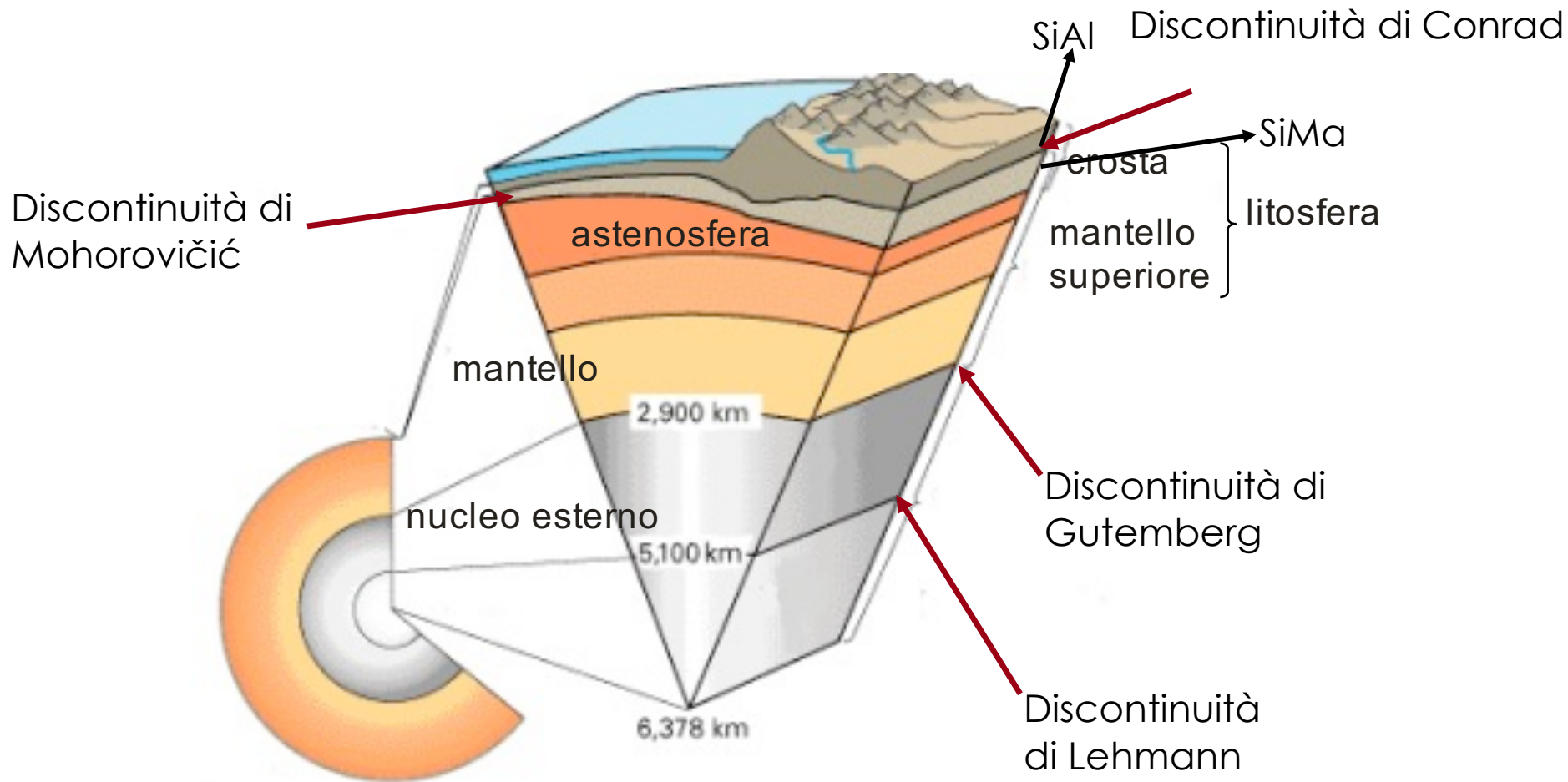


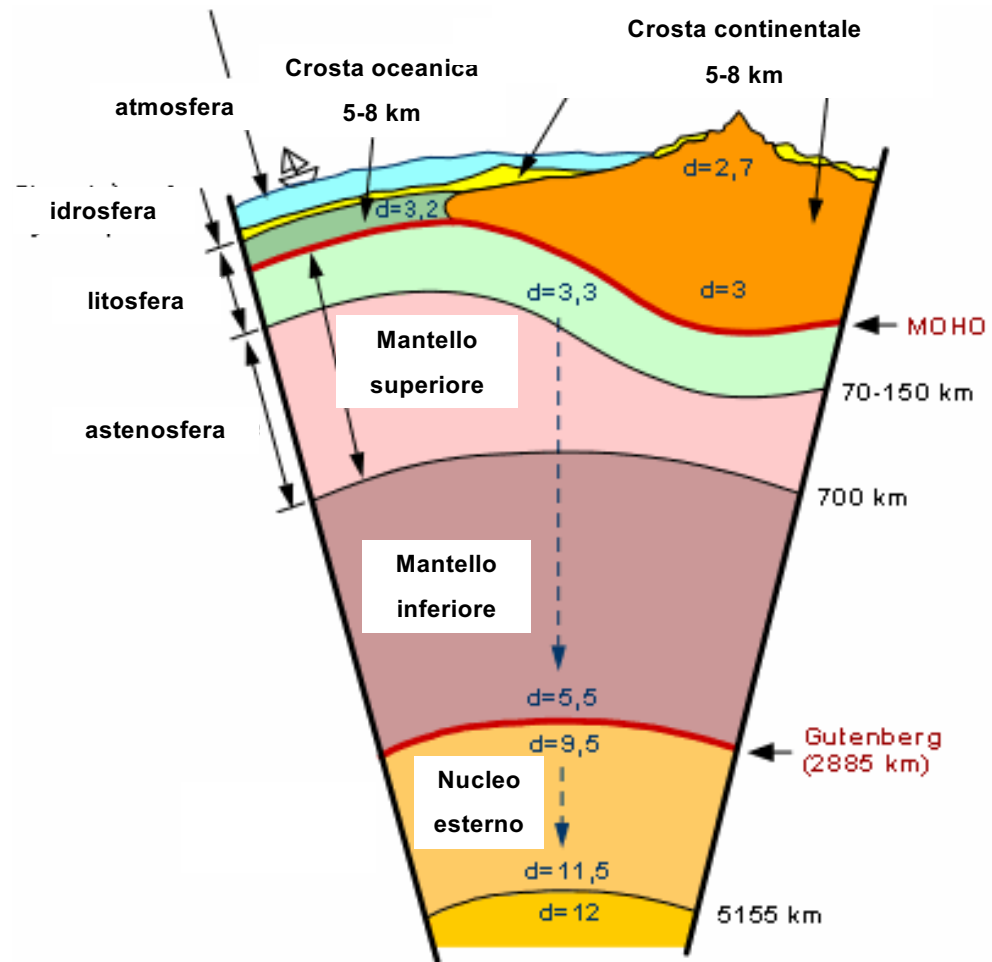
| livello | | Vp km s ⁻¹ | Densità 10 ³ kg m ⁻³ | Pressione kb, 10 ⁻¹ GPa | % vol. | Natura dei materiali |
|----------|-----------|--------------------------|---|---------------------------------------|-----------|--|
| crosta | superiore | 6.5 | 2.7 | | 1.6 | SOLIDA, eterogenea |
| | inferiore | 6.9 | 2.8 2.9 | 9 | | SOLIDA gabbrica (oceani) granulitica/granitoide (cont.) |
| mantello | superiore | 8.1 | 3.3 | | 82.2 | peridotite |
| | | 7.8 (LVL) | | | | Peridotite (T vicina a T _{solidus}) |
| | | 8.1 | | | | Peridotite (minerali alta densità) |
| | inferiore | 10.7 13.6 | 4.3 5.7 | 270 1368 | | Peridotite (minerali alta densità) |
| nucleo | esterno | 8.1 10.3 | 9.7 11.8 | 3180 | 16.2 | LIQUIDO lega Fe-Ni |
| | interno | 11.2 | ≈ 14 ≈ 16 | 3300 3600 | | SOLIDO lega Fe-Ni |

Struttura a gusci del globo terrestre

I vari involucri sono separati da discontinuità geofisiche







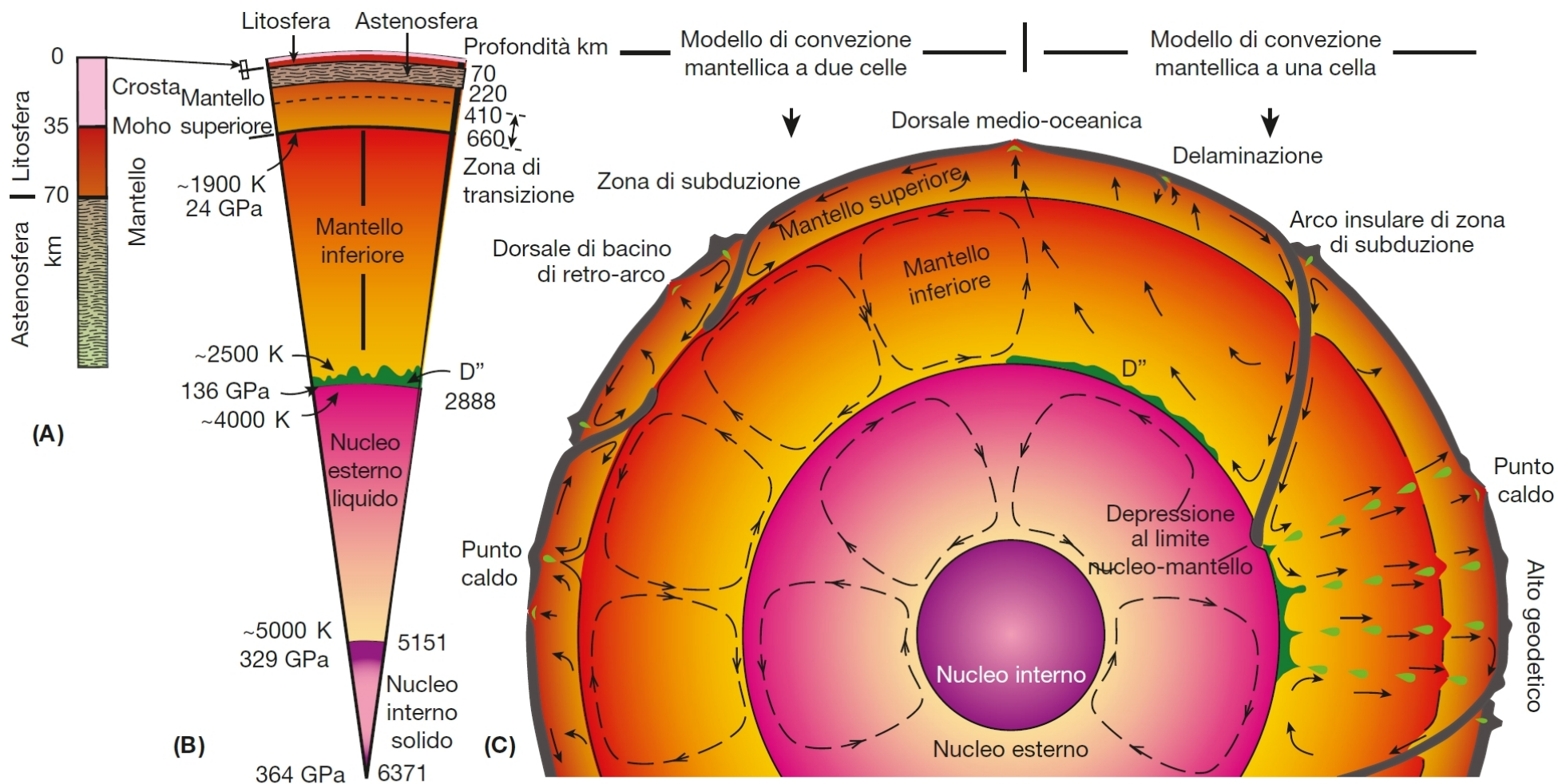


Figura 1.5 Le principali unità strutturali dell'interno della Terra. (A) Sezione della litosfera. (B) Sezione della Terra con profondità, pressione e temperatura in corrispondenza delle principali discontinuità sismiche. (C) Sezione della Terra con indicazione dei modelli convettivi a due celle e a una cella (rispettivamente a sinistra e a destra). Le porzioni di mantello in fusione parziale e risalita verso la superficie sono indicate in verde chiaro.

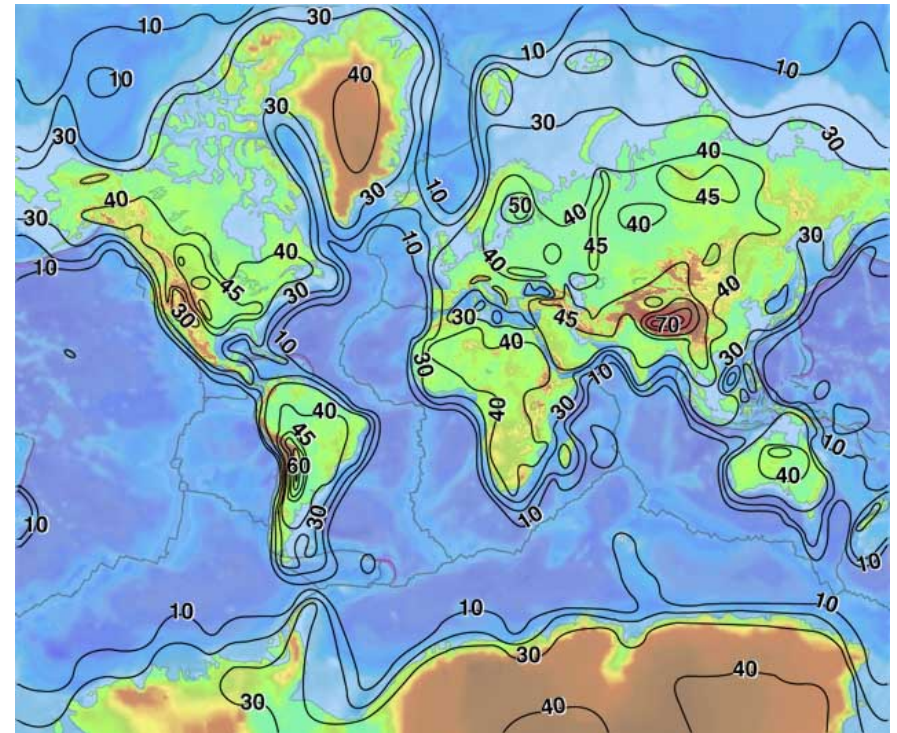
Crosta

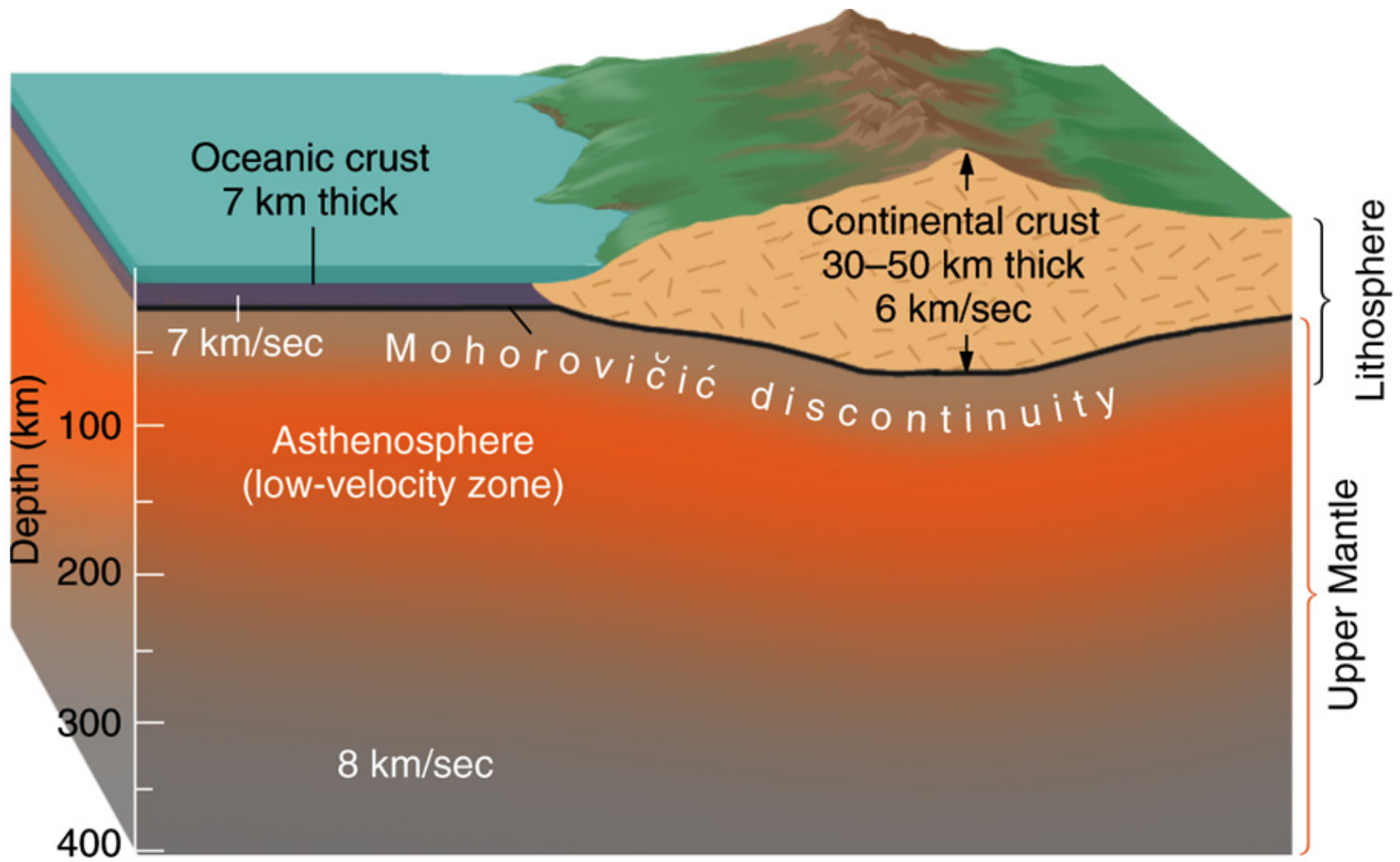
- parte più esterna della Terra
- rappresenta meno dello **0.1% del volume della Terra**
- superiormente a contatto con atmosfera, idrosfera e biosfera
- inferiormente delimitata dalla **discontinuità di Mohorovičić**

- **spessore variabile**

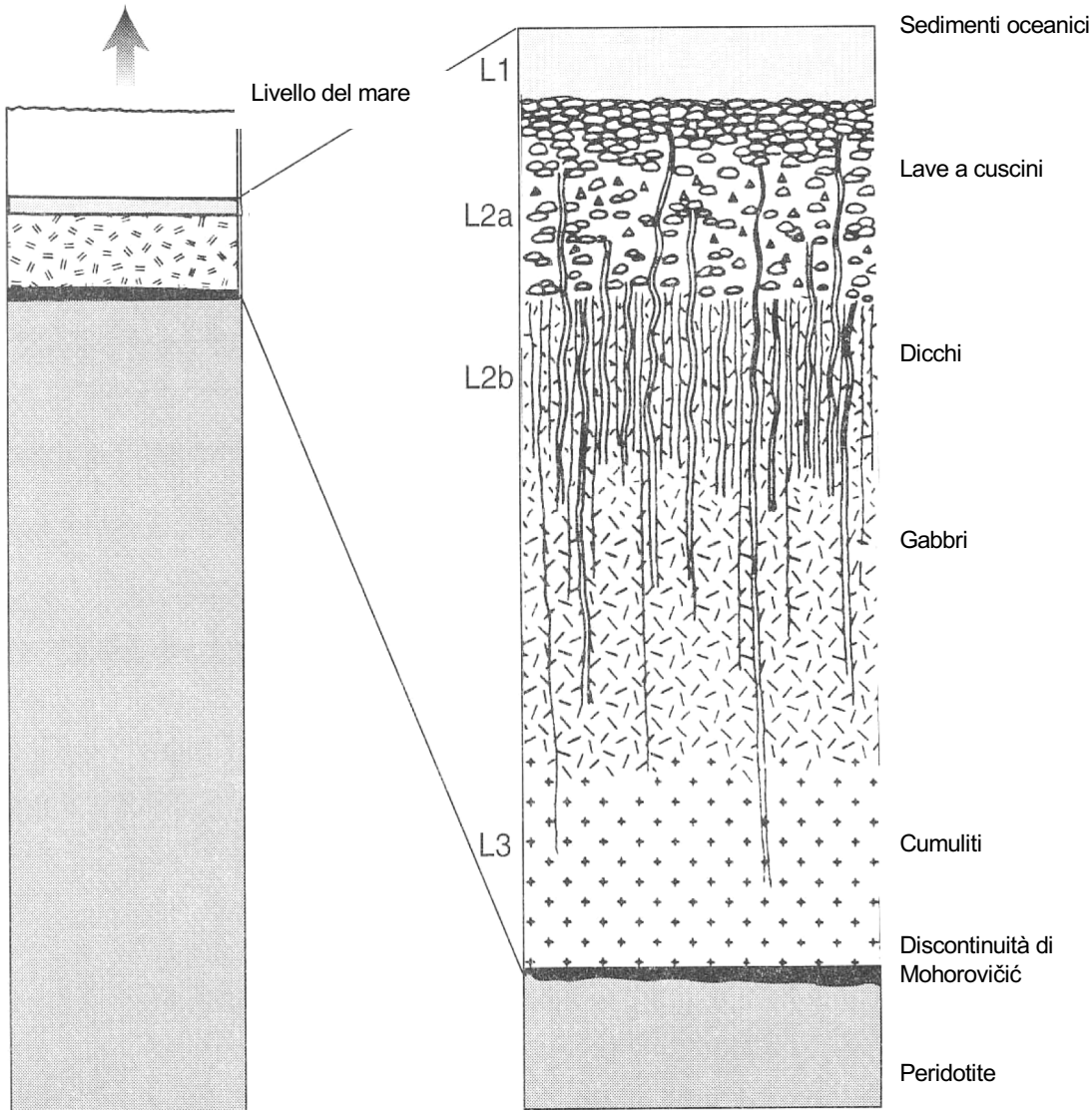


- composizione variabile: - crosta continentale
 - crosta oceanica

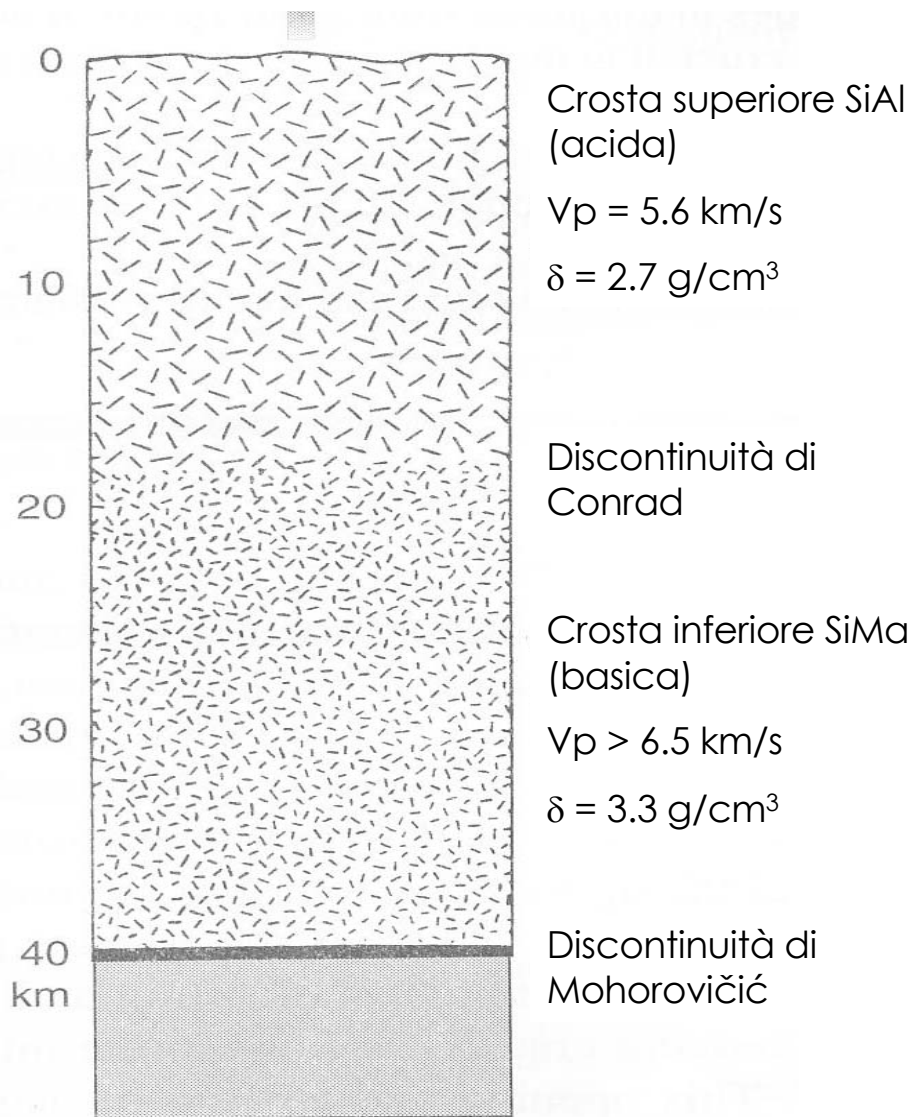




Crosta oceanica



- **composizione mafica** (basaltica)
- composta da **rocce effusive ed intrusive**
- si forma per **fusione parziale del mantello** in corrispondenza dei margini divergenti medio oceanici
- spessore **5-10 km**
- età: non più vecchia di 200 Ma



Crosta continentale

- **composizione variabile**
- composta da **rocce magmatiche, metamorfiche e sedimentarie**
- interessata da importanti **deformazioni**
- **spessore variabile**,
media = 40 km
- età: la maggior parte formata durante il Precambriano (570 Ma), vecchia fino a 4 Ga

Composizione chimica media della crosta e del mantello superiore

| | Crosta totale | Crosta continentale totale | Crosta continentale superiore | Crosta continentale inferiore | Crosta oceanica | Mantello superiore: modello pirolitico |
|----------------------------------|---------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|--|
| SiO ₂ ↑ | 59,38 | 61,97 | 66,0 | 54,0 | 50,07 | 45,1 |
| TiO ₂ | 0,81 | 0,75 | 0,6 | 0,9 | 1,30 | 0,2 |
| Al ₂ O ₃ ↑ | 15,77 | 15,62 | 16,0 | 19,0 | 16,38 | 3,3 |
| Fe ₂ O ₃ ↓ | 2,61 | 2,55 | | | 2,76 | |
| FeO ↓ | 4,40 | 3,88 | 4,5 | 9,0 | 6,32 | 8,0 |
| MnO | 0,16 | 0,14 | | | 0,22 | 0,15 |
| MgO ↓ | 4,00 | 3,15 | 2,3 | 4,1 | 7,12 | 38,1 |
| CaO ↑ | 7,20 | 5,67 | 3,5 | 9,5 | 12,56 | 3,1 |
| Na ₂ O ↑ | 2,97 | 3,08 | 3,8 | 3,35 | 2,66 | 0,4 |
| K ₂ O ↑ | 2,41 | 2,94 | 3,3 | 0,6 | 0,48 | 0,03 |
| P ₂ O ₅ | 0,23 | 0,25 | | | 0,13 | 0,02 |

Composizione di una **granodiorite**,
ricca in elementi **litofili SiAl**

Composizione mafica (basaltica)

Composizione **intermedio-acida**,
tipo granulitico, ricca in elementi
ferromagnesiaci SiMa

| Mantello | | |
|--------------------------------|---------------|------------------|
| Ossidi | Mason 1966 | Ringwood 1966 |
| SiO ₂ | 48 | 43 |
| MgO | 31 | 38 |
| FeO | 13 | 9.3 |
| Fe ₂ O ₃ | - | - |
| Al ₂ O ₃ | 3.0 | 3.9 |
| CaO | 2.3 | 3.7 |
| Na ₂ O | 1.1 | 1.8 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.55 | - |
| MnO | 0.43 | |
| P ₂ O ₅ | 0.34 | |
| K ₂ O | 0.13 | |
| TiO ₂ | 0.13 | |

Mantello

- **68% della massa della Terra**

zona non accessibile

→ composizione desunta in base a:

- modello condritico (Ringwood);

- modello pyrolitico

(pyrolite la roccia la cui fusione parziale genera un magma basaltico);

- composizione degli xenoliti



peridotiti lherzolitiche

(olivina, clinopirosseno e ortopirosseno)

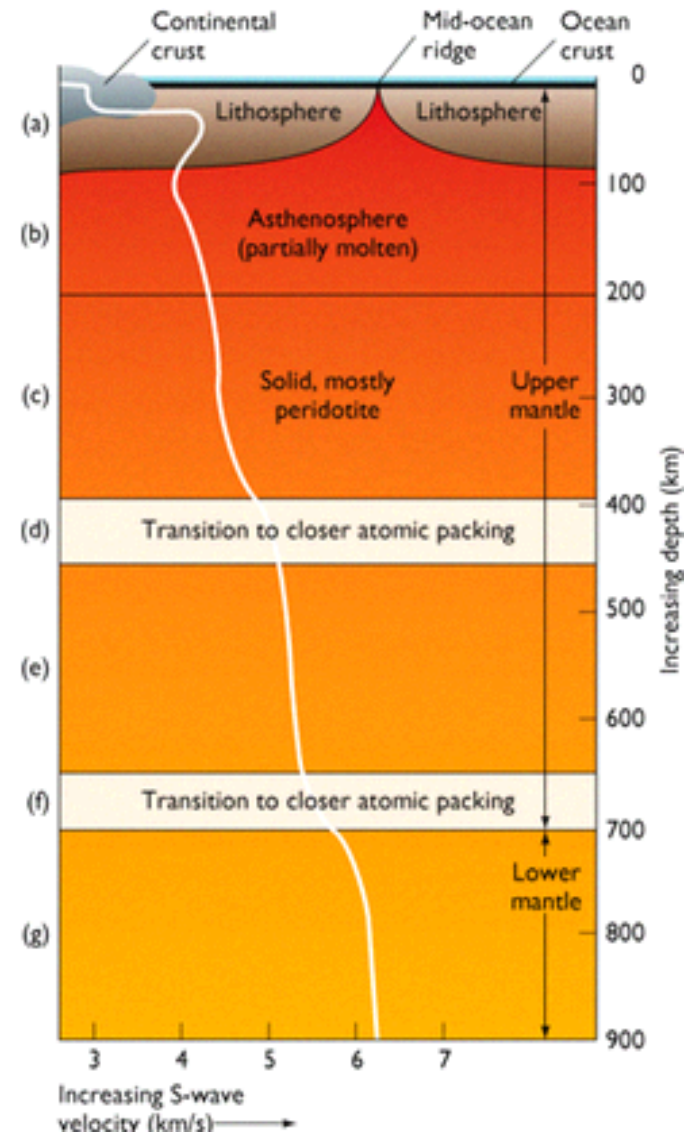
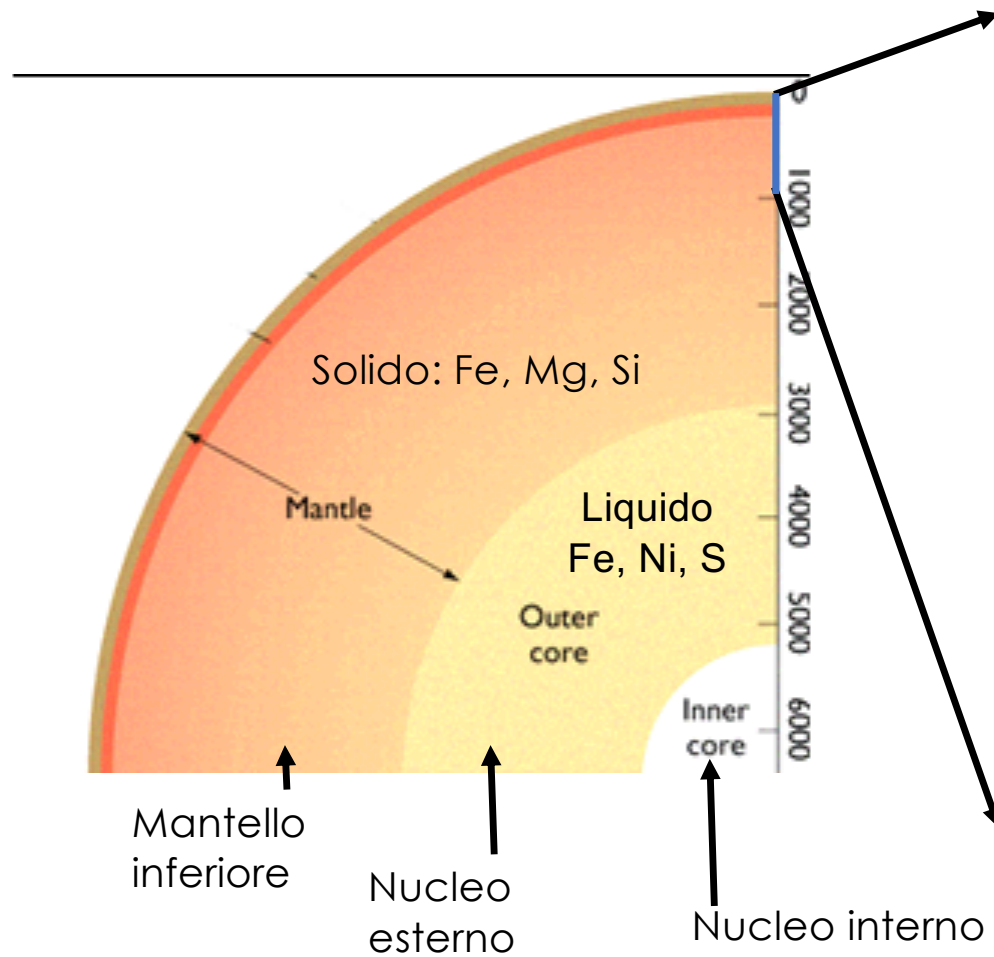
Al variare della profondità, entro il mantello risultano stabili diverse facies della lherzolite:

P < 10 kbar lherzolite a plagiocalcio

P = 10-20 kbar lherzolite a spinello

P > 20 kbar lherzolite a granato

Mantello superiore



Mantello superiore : fino a 400 km, composto da lherzoliti
regione sorgente dei magmi basici
composto in parte da litosfera e in parte da astenosfera

contiene la low-velocity zone (LVZ): zona a bassa
velocità delle onde S, posta tra gli 80 e i 300 km,
che delimita il limite tra litosfera e astenosfera

Zona transizione: 400-1000 km a importanti variazioni strutturali delle fasi:

- olivina in β - Mg_2SiO_4 , fase che a sua volta diventa più stabile con una struttura tipo spinello e poi tipo perovskite
- clinopirosseno si trasforma in β - Mg_2SiO_4 + stishovite.

↓
densità via via più elevata

Mantello inferiore: 1000-2990 km, fasi con struttura perovskitica.

Nucleo

| NUCLEO | | |
|--------|---------------|------------------|
| | Mason 1966 | Ringwood 1966 |
| Fe | 86 | 84 |
| Si | – | 11 |
| Mg | 6.0 | |
| S | 7.4 | – |
| Ni | | 5.3 |
| Co | 0.40 | – |

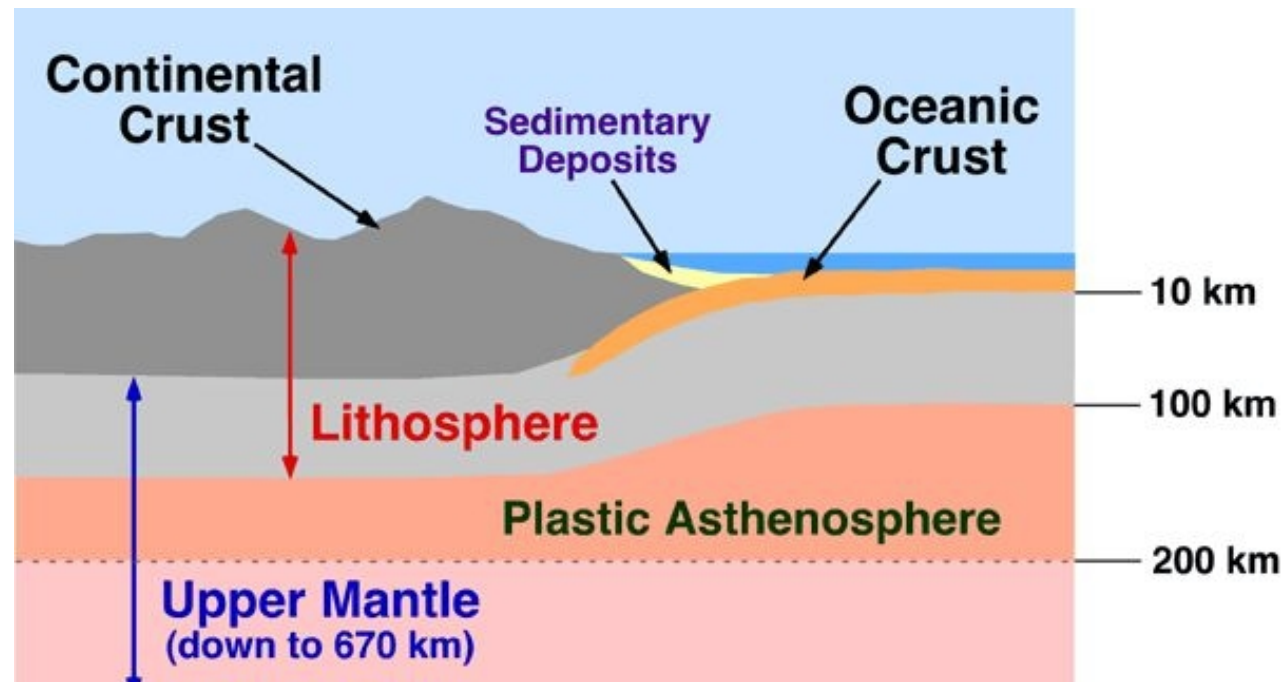
- 31% della massa della Terra
- nucleo esterno: 2290-5200 km
liquido $\delta = 10 \text{ g/cm}^3$
composto da: Fe Ni, S
- nucleo interno: solido $\delta = 12 \text{ g/cm}^3$
composto da: ferro metallico

Litosfera e Astenosfera

Litosfera: porzione esterna della Terra caratterizzata da *comportamento rigido ed elastico* ed è formata da crosta e da parte del mantello superiore

Astenosfera: parte di mantello a *comportamento plastico*, sede di *celle termoconvettive*, sulla quale scivola la litosfera

Questi due termini non vanno confusi con crosta e mantello



Condizioni fisiche ambientali possibili

Crosta

- **Ambienti superficiali (comuni):** - T e P basse
 - contatto con idrosfera (*interazioni*)
 - contatto con atmosfera (*interazioni*)
 - contatto con biosfera (*interazioni*)

I materiali costituenti le rocce preesistenti vengono **distribuiti:**

a) mediante processi **fisici** (gravità, correnti, ecc.)

b) mediante processi **chimici** (soluzione, ecc.)

per formare i **sedimenti** e le **rocce sedimentarie**



processi sedimentari

Si può assistere anche a **processi magmatici effusivi**

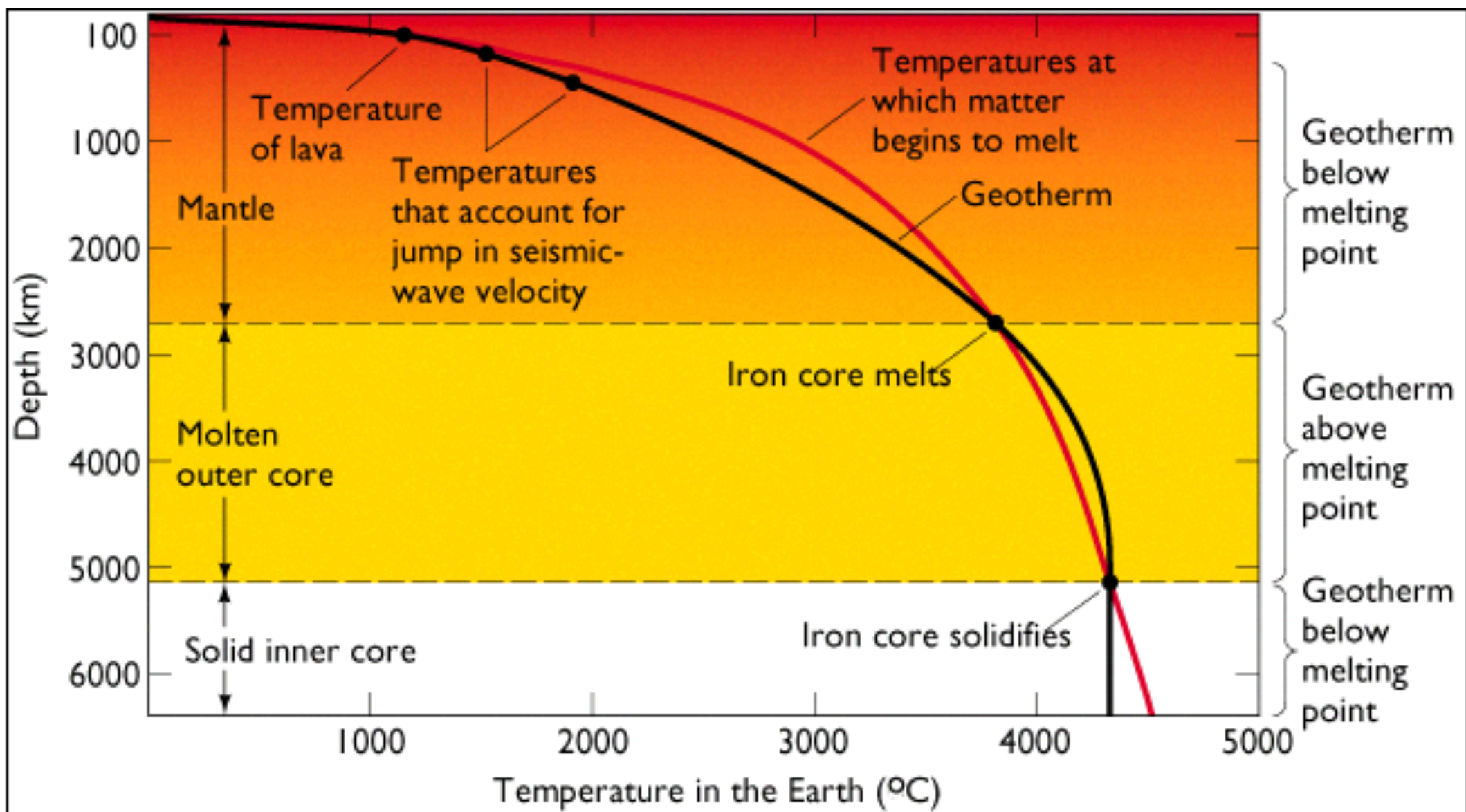
- **Ambienti profondi** : T e P crescono con la profondità

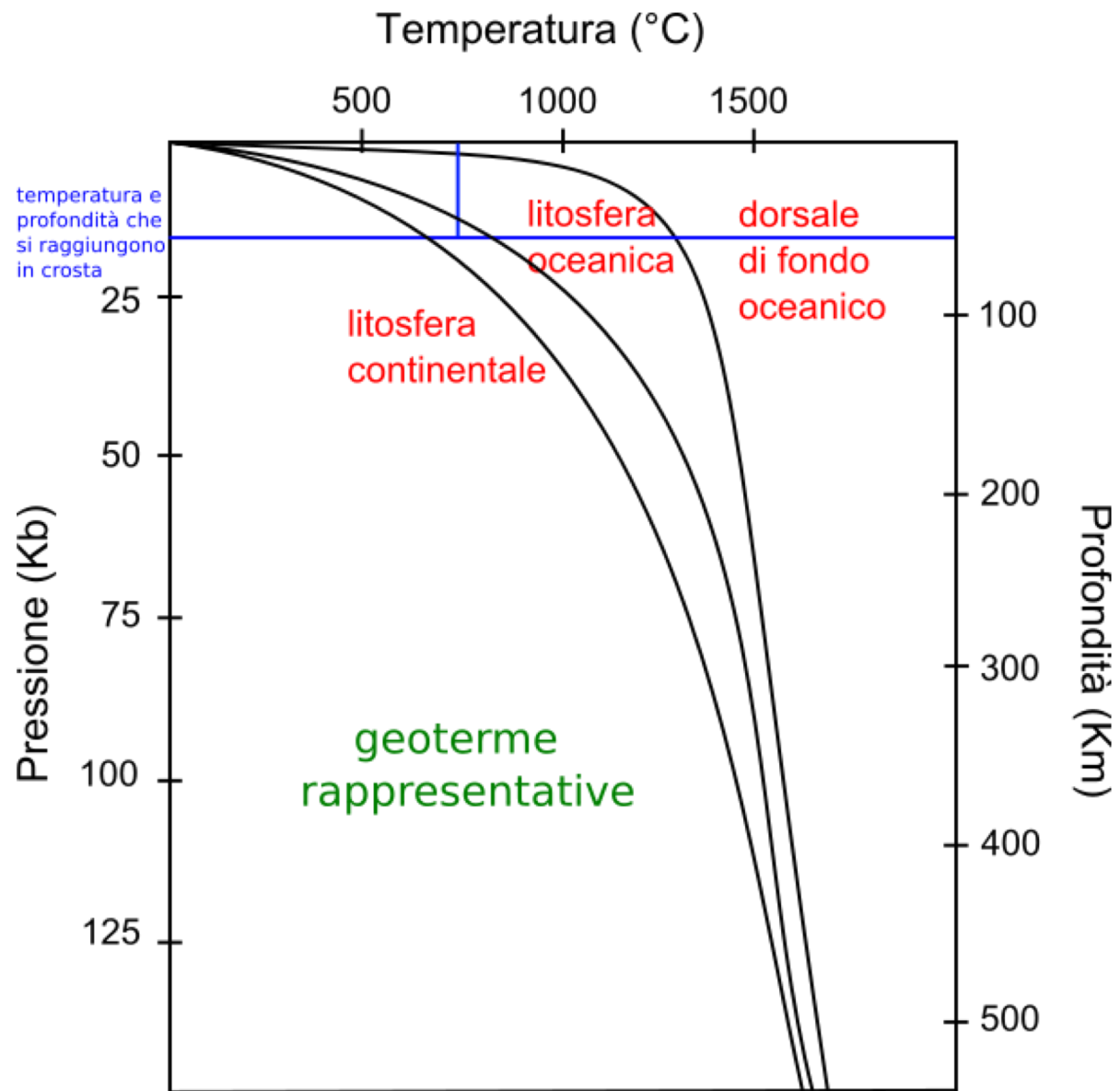
| Pressione : 250-300 bar/km | Km | Kb | Gpa |
|--|-----------|-----------|------------|
| | 3 | 0.7-0.9 | 0.07-0.09 |
| 1 bar = 10⁶ dyn/cm² = 0.986 atm | 10 | 2.5-3 | 0.25-0.3 |
| 1 Kb = 1000 bar = 986.923 atm | 30 | 7.5-9 | 0.75-0.9 |
| 1 Gpa = 10 Kb | 50 | 12.5-15 | 1.2-1.5 |

Tempuratura

- nella crosta: gradienti termici comuni fra i 20 °C/km e 40 °C/km
- al limite crosta-mantello: $\approx 2000^{\circ}$ C
- al limite nucleo-mantello: $> 3000^{\circ}$ C

? Materiali solidi o fusi





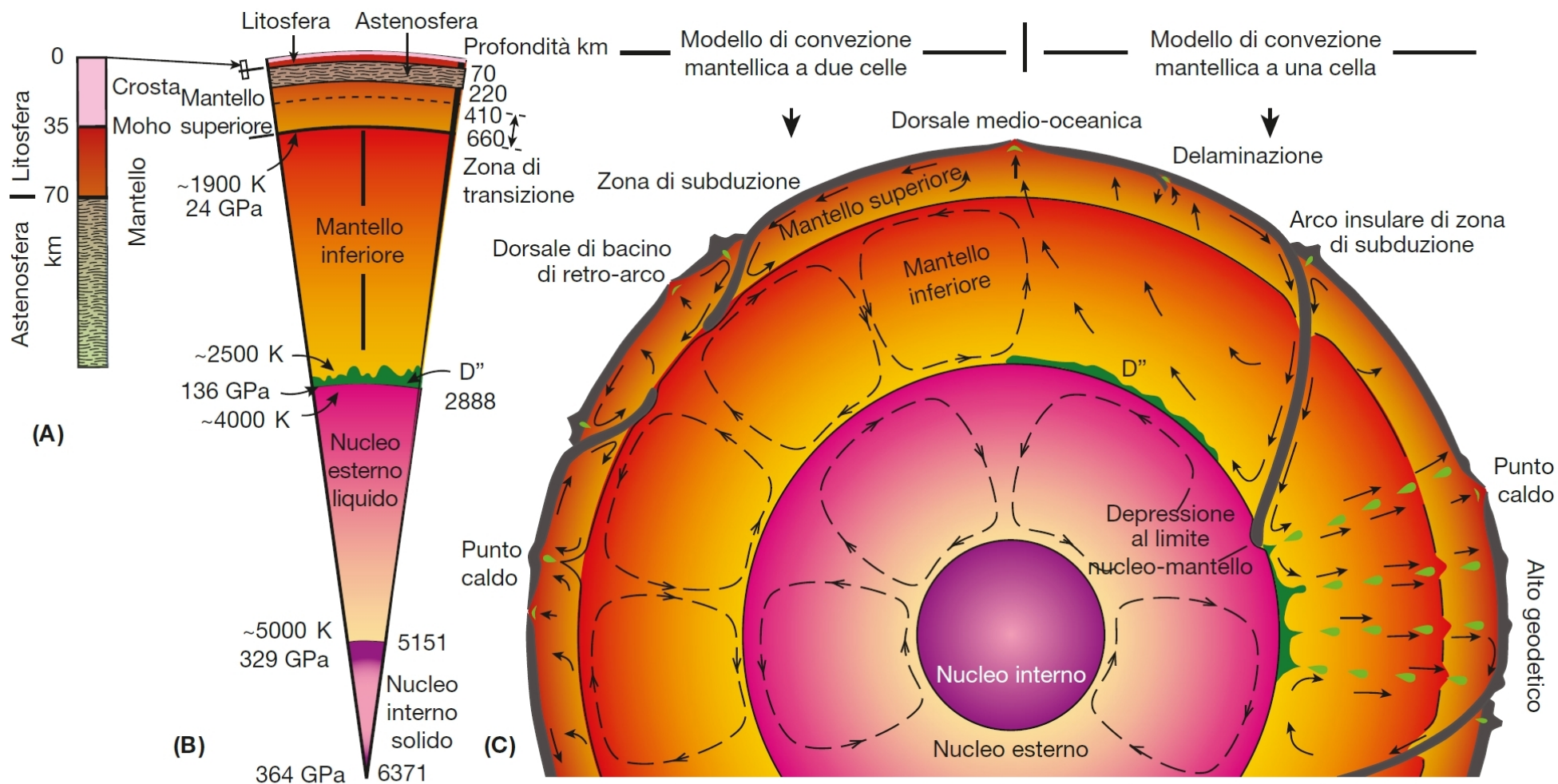


Figura 1.5 Le principali unità strutturali dell'interno della Terra. (A) Sezione della litosfera. (B) Sezione della Terra con profondità, pressione e temperatura in corrispondenza delle principali discontinuità sismiche. (C) Sezione della Terra con indicazione dei modelli convettivi a due celle e a una cella (rispettivamente a sinistra e a destra). Le porzioni di mantello in fusione parziale e risalita verso la superficie sono indicate in verde chiaro.