



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

# Fisica Terrestre

Tettonica delle placche

Veronica Pazzi - [veronica.pazzi@units.it](mailto:veronica.pazzi@units.it)

# Argomenti del corso

Il corso è suddiviso in diverse unità didattiche.

In particolare:

- Introduzione alla materia (docente: Prof. V. Pazzi)
- Teoria delle placche (docente: Prof. V. Pazzi)
  - Esercitazioni in aula (docente: Prof. V. Pazzi)
- Terremoti (docente: Prof. G. Costa)
  - Matrici (docente: Prof. G. Costa)
  - Equazioni del moto armonico e teoria delle onde (docente: Prof. G. Costa)
  - Esercitazioni in aula (docente: Prof. G. Costa)
- Gravimetria (docente: Prof. G. Costa)
- Magnetismo (docente: Prof. V. Pazzi)
- Geotermia (docente: Prof. V. Pazzi)

# Indice

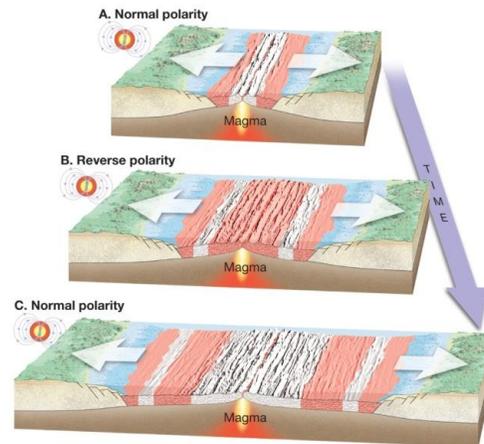
- Tettonica delle placche: cosa è?
- Tettonica delle placche: struttura interna della Terra
- Tettonica della placche: quando nasce?
- Tettonica delle placche: cosa dice?
- Terronica delle placche: il territorio italiano
- Tettonica delle placche: calcolo dei movimenti reciproci delle placche e diagrammi di velocità

# Tettonica delle placche: cosa è?

# Tettonica delle placche: cosa è?

Le discipline della geofisica che si occupano della componente solida del globo sono:

Tettonofisica e geodinamica



**Tettonica: Studio delle forze all'interno della terra** che danno luogo ai **continenti**, ai **fondali oceanici**, alle **catene montuose**, ai **terremoti** e alla loro distribuzione, e ad altri fenomeni superficiali a grande scala

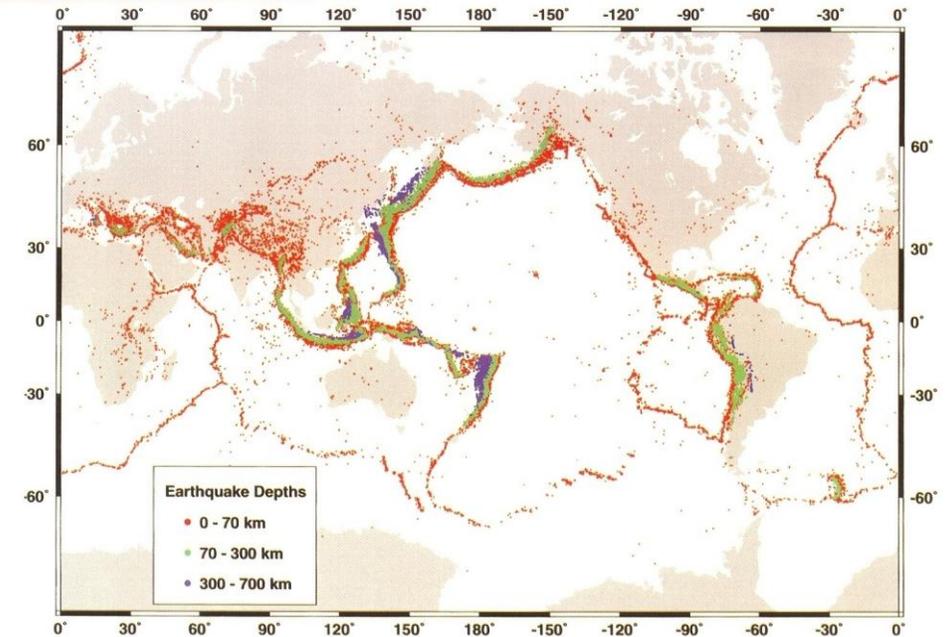
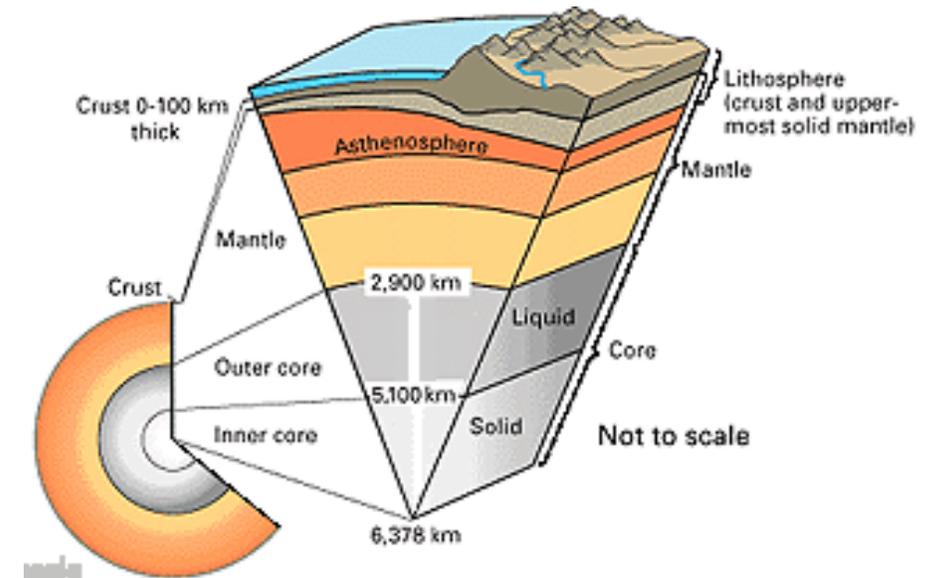


Figure 2.2. The global distribution of both shallow and deep seismicity for well-located earthquakes with magnitude > 5.1. The shallow seismicity closely delineates plate boundaries. Based on Engdahl et al. (1998).

# Tettonica delle placche: cosa è?

La terra, da un punto di vista della composizione chimica è costituita da tre strati visti come gusci concentrici: **crosta, mantello e nucleo**, mentre dal punto di vista della reologia abbiamo **litosfera, astenosfera e mesosfera**

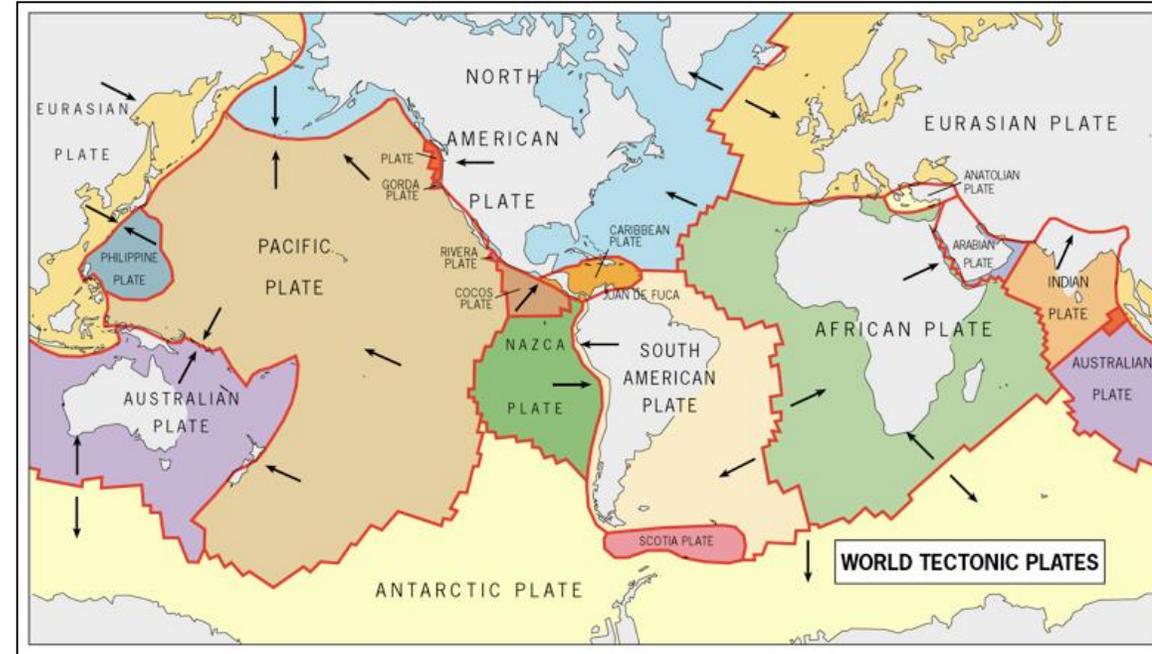


# Tettonica delle placche: cosa dice?

La terra, da un punto di vista della composizione chimica è costituita da tre strati visti come gusci concentrici: **crosta, mantello e nucleo**, mentre dal punto di vista della reologia abbiamo **litosfera, astenosfera e mesosfera**

**Nuovo materiale si crea** in corrispondenza delle dorsali medio oceaniche e forma placche rigide. L'area della superficie della terra rimane costante quindi l'espansione dei fondali oceanici deve essere **bilanciata da un riassorbimento di materia**

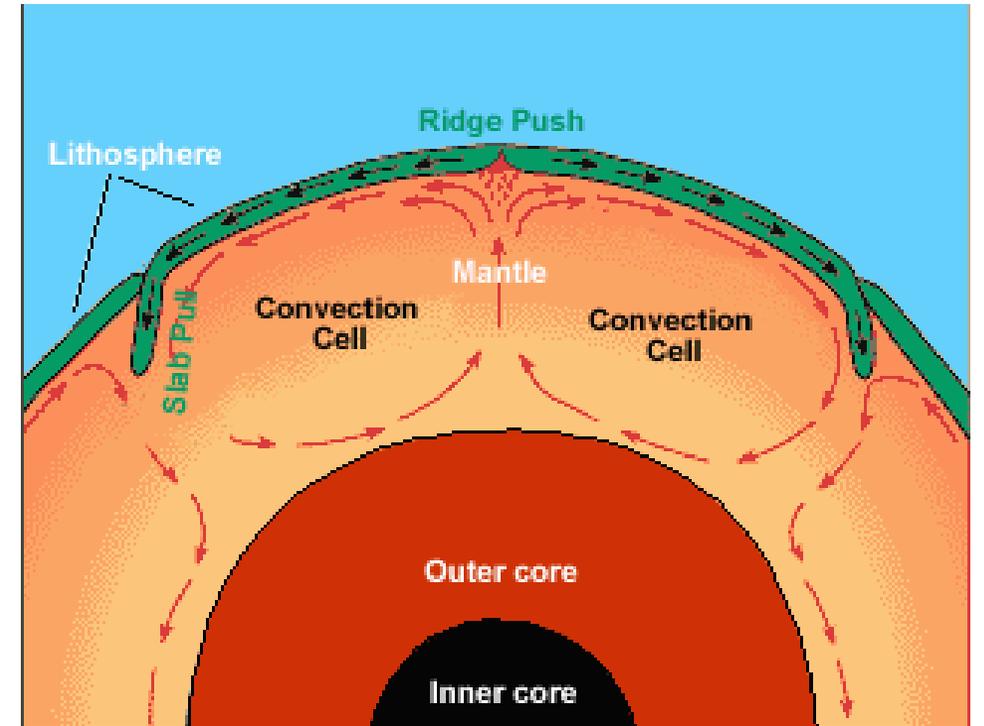
La litosfera è divisa in porzioni rigide (quelle di maggiori dimensioni sono una dozzina, ma ne esistono molte altre di più piccole dimensioni) dette **placche** che “galleggiano” sull'astenosfera



# Tettonica delle placche: cosa dice?

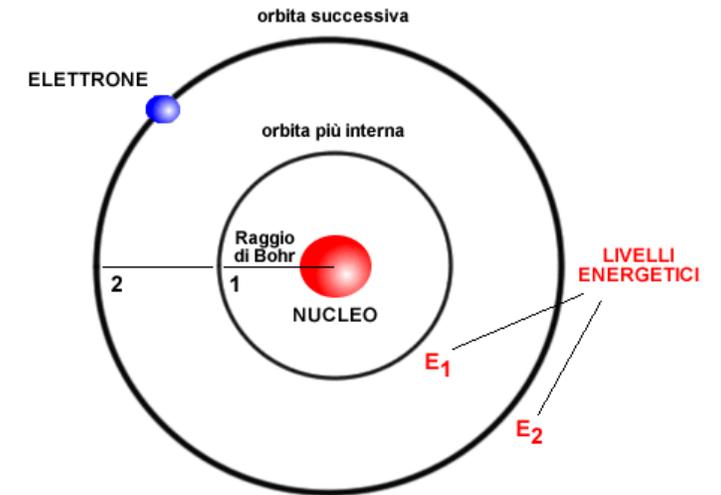
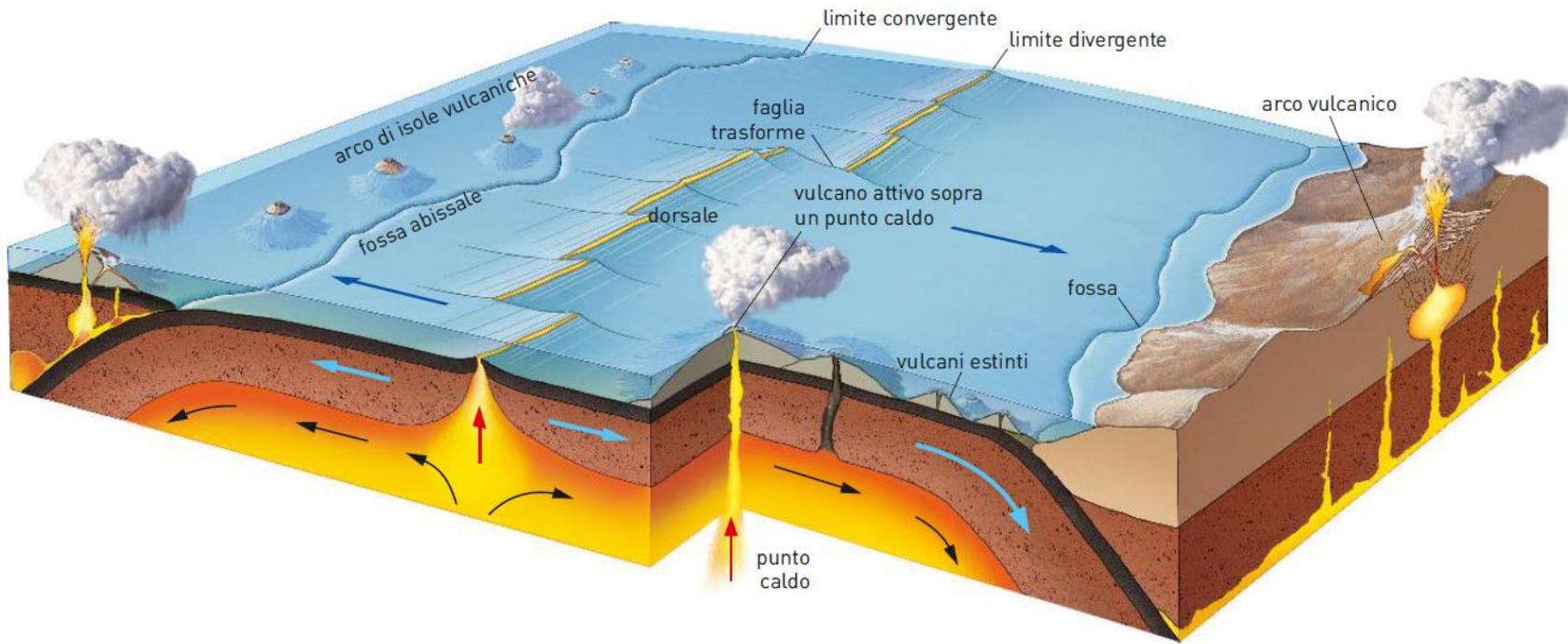
I **movimento** relativi tra le placche avvengono solamente **lungo i bordi**

Il movimento è innescato da **correnti convettive** che risalgono dal centro della terra



# Tettonica delle placche: cosa è?

Teoria tettonica delle placche : scienze geologiche/geofisiche = Teoria atomo di Bohr : fisica



WWW.ANDREAMININI.COM

Teoria tettonica delle placche:

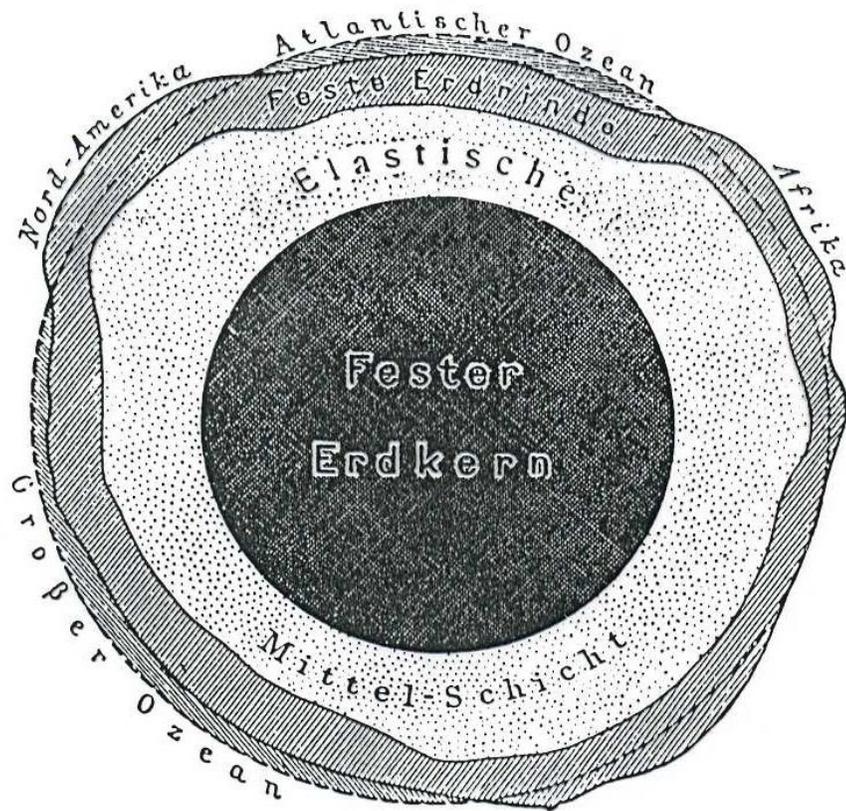
semplice

elegante

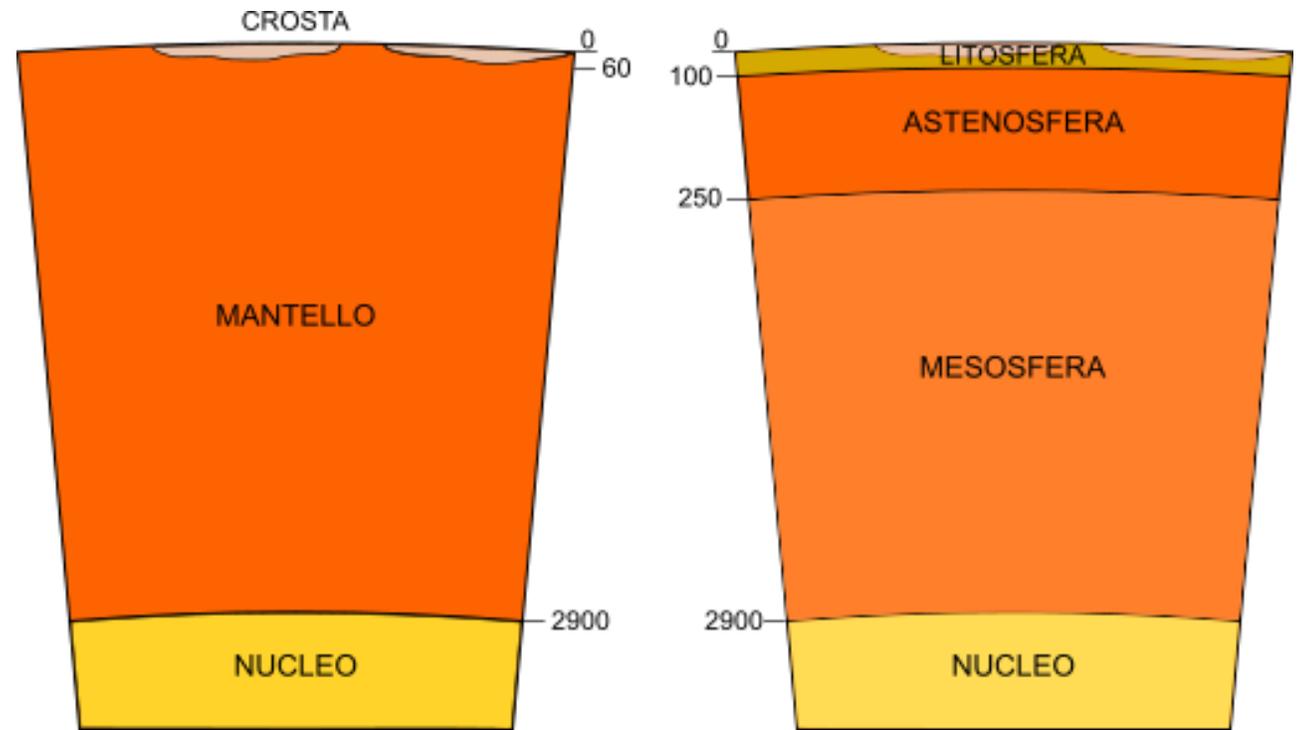
capace di spiegare un gran numero di esperimenti ed osservazioni

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



Schizzo dell'interno della Terra pubblicato a Berlino nel 1902 (H.Kramer). La Terra ha tre strati: una crosta solida, un mantello elastico e un nucleo solido.



Composizione

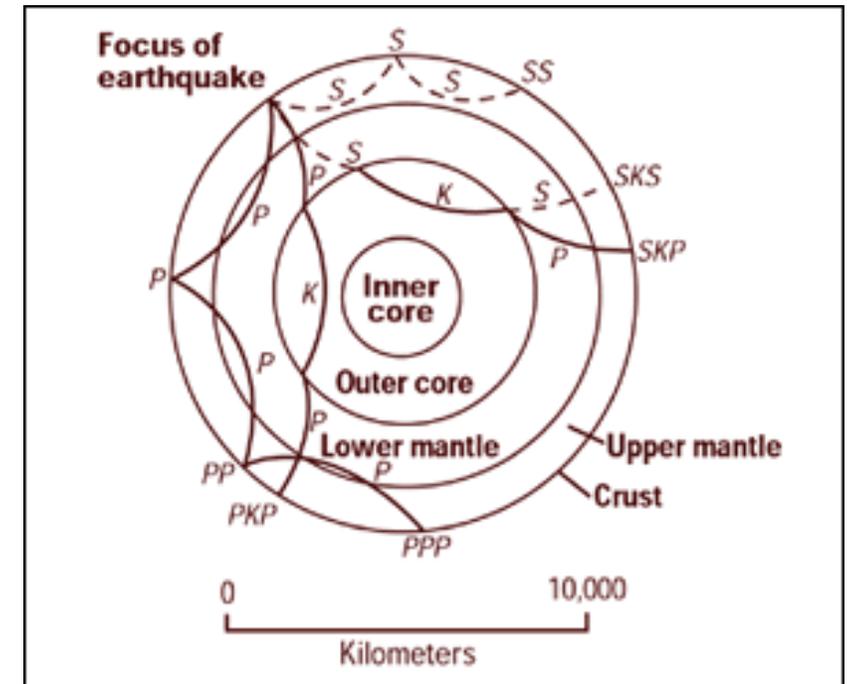
Reologia

Struttura della terra in funzione della composizione chimica e della reologia dei materiali.

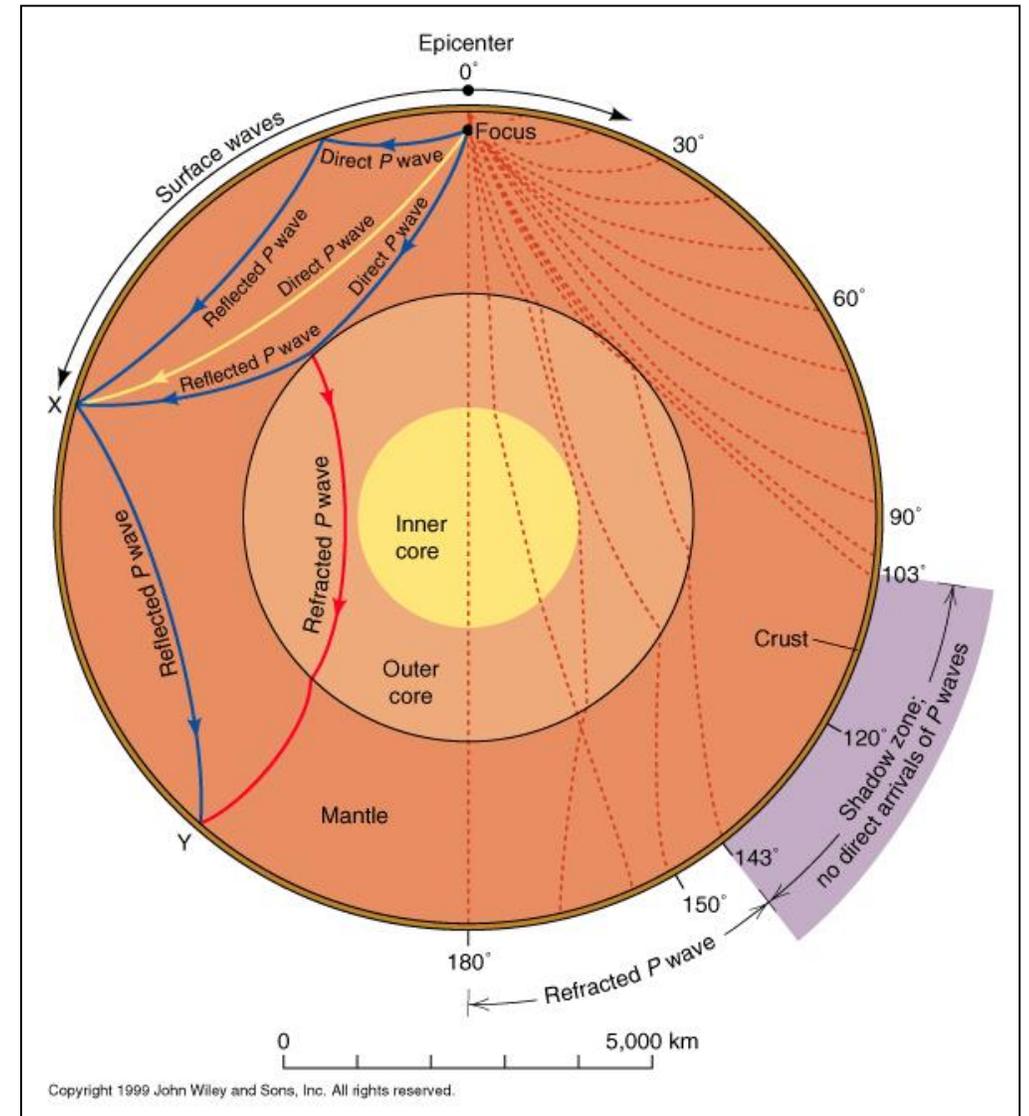
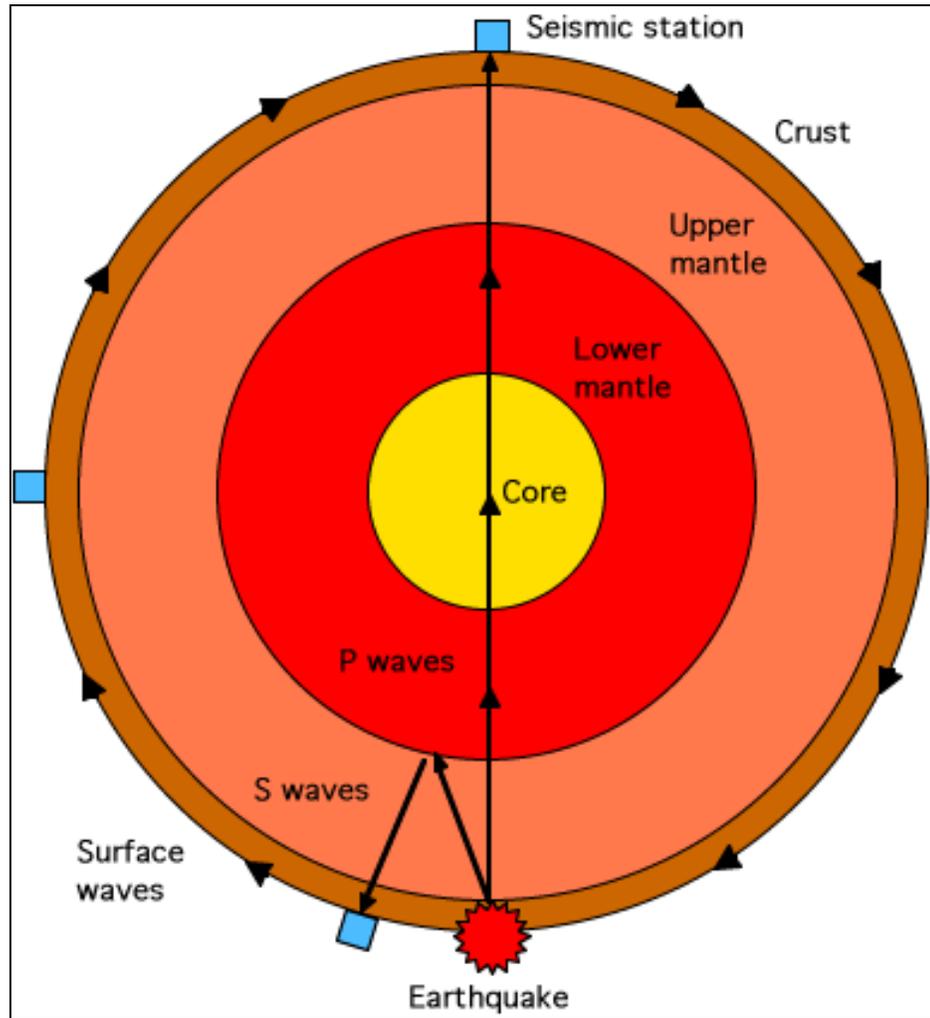
# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

Come conosciamo la struttura interna della Terra?

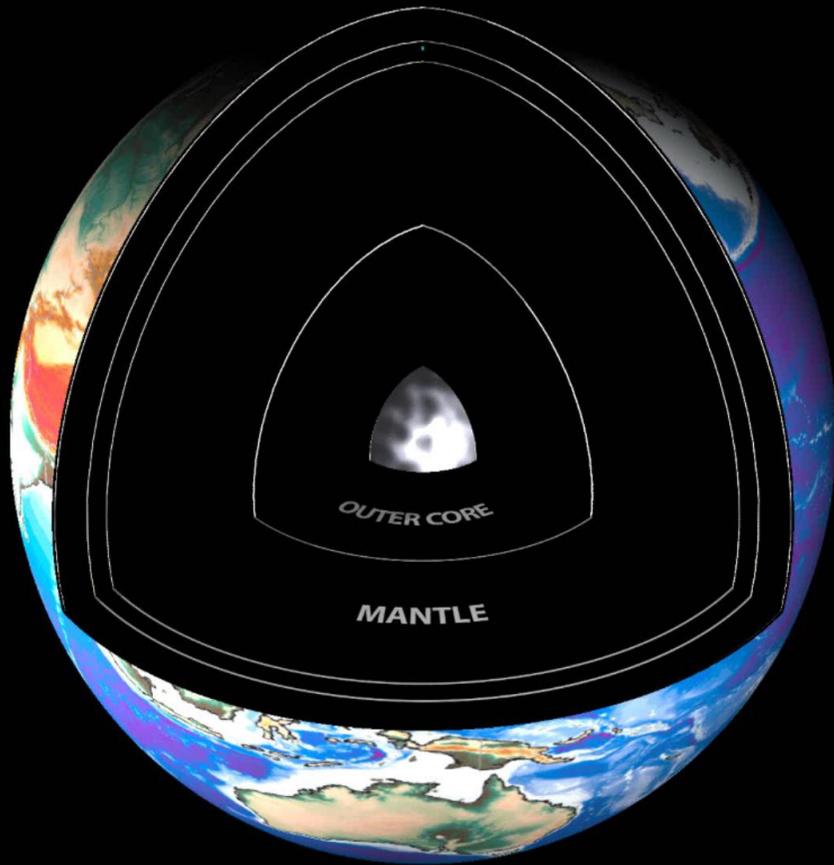
Grazie alle indagini geofisiche: sismica/sismologia, gravimetria, magnetismo, geo-elettrica, geodesia



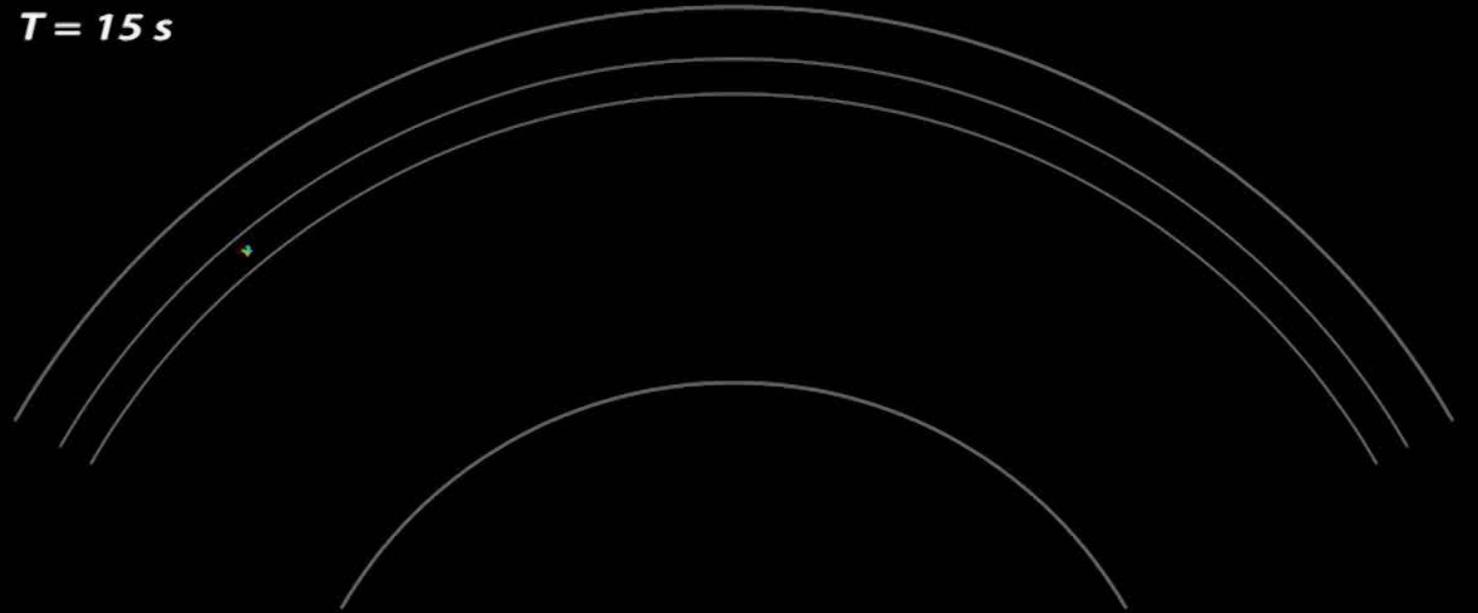
# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

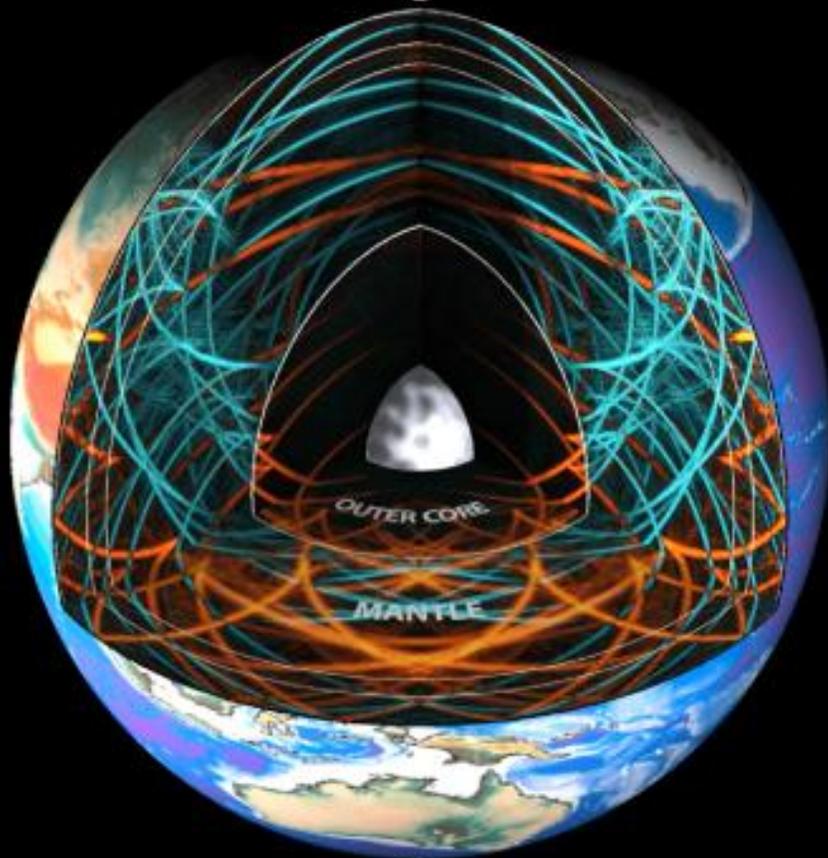


*Phases: S, ScS (60°)*  
*Depth: 500 km*  
*T = 15 s*

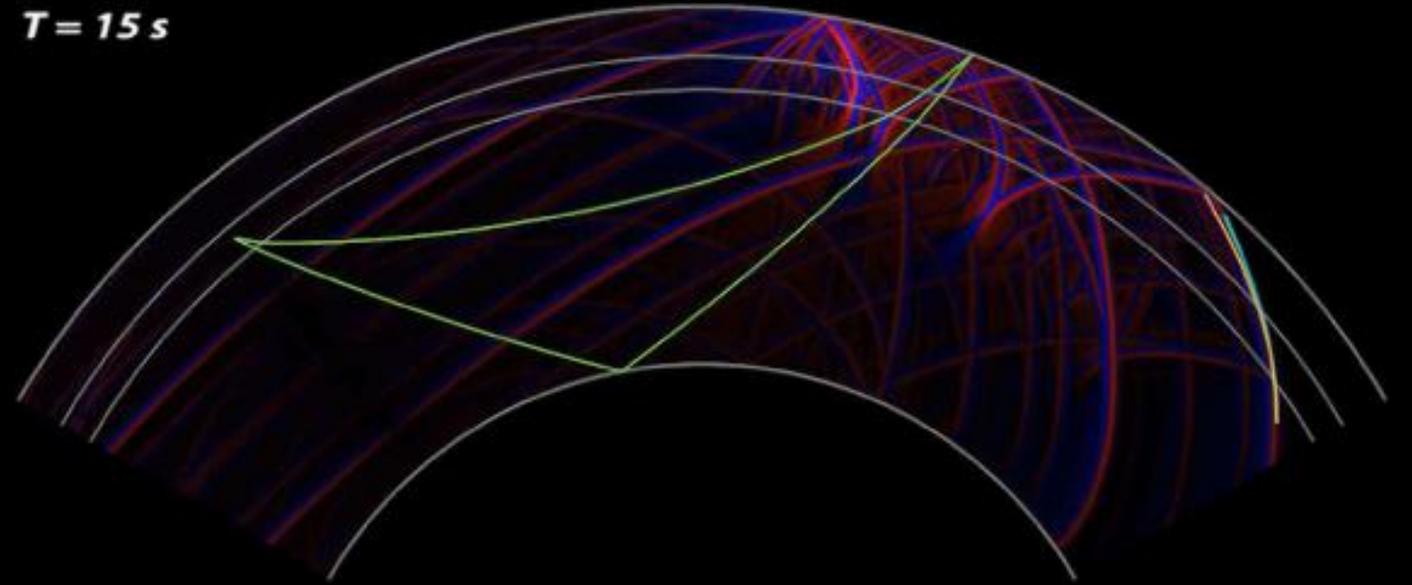


<http://web.utah.edu/thorne>

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



*Phases: S, ScS (60°)*  
*Depth: 500 km*  
*T = 15 s*

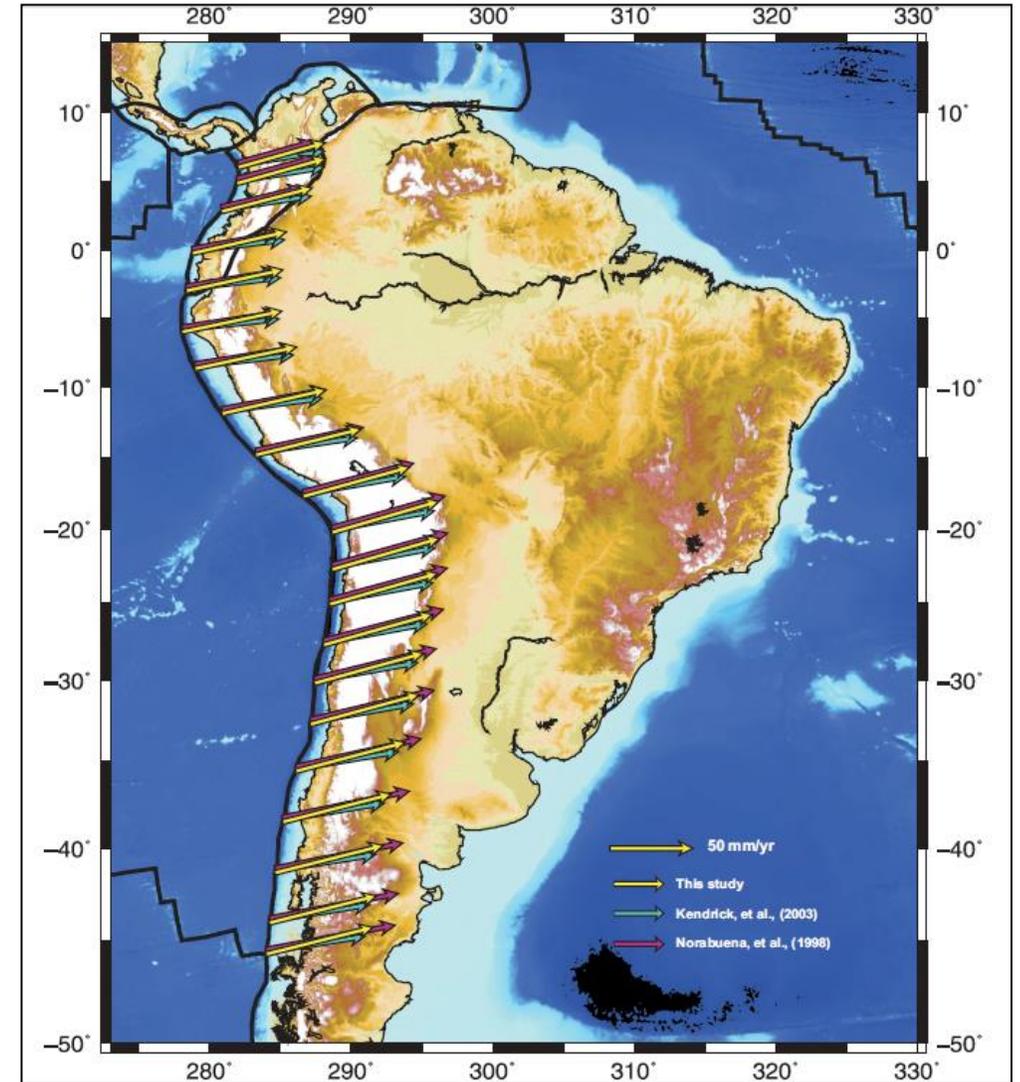
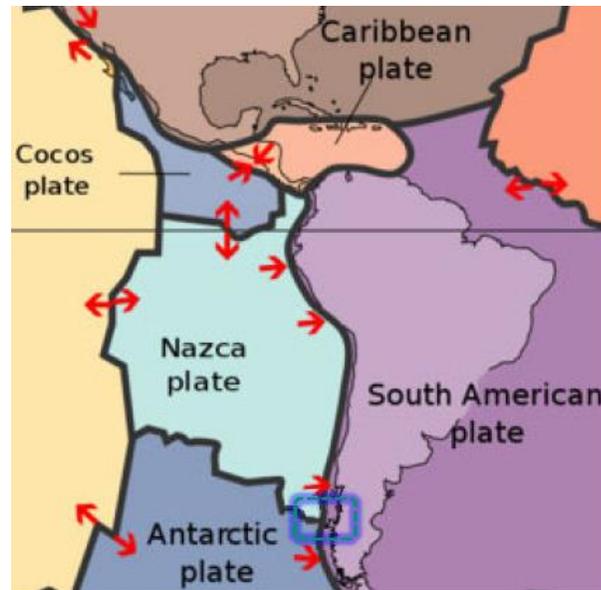


<http://web.utah.edu/thorne>

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

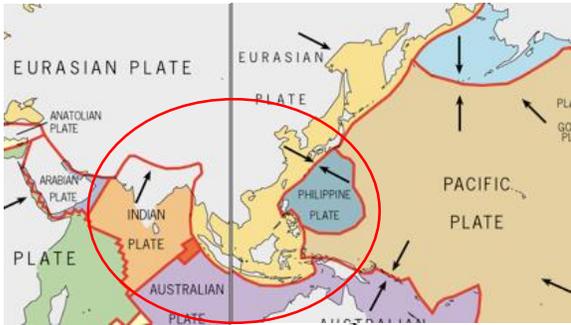
Le misure GPS, attraverso una rete di sensori, danno informazioni sulle velocità della crosta superficiale in un sistema di riferimento globale o in relazione ad un punto assunto come noto/fisso

Danno quindi informazioni sulle deformazioni in funzione del tempo



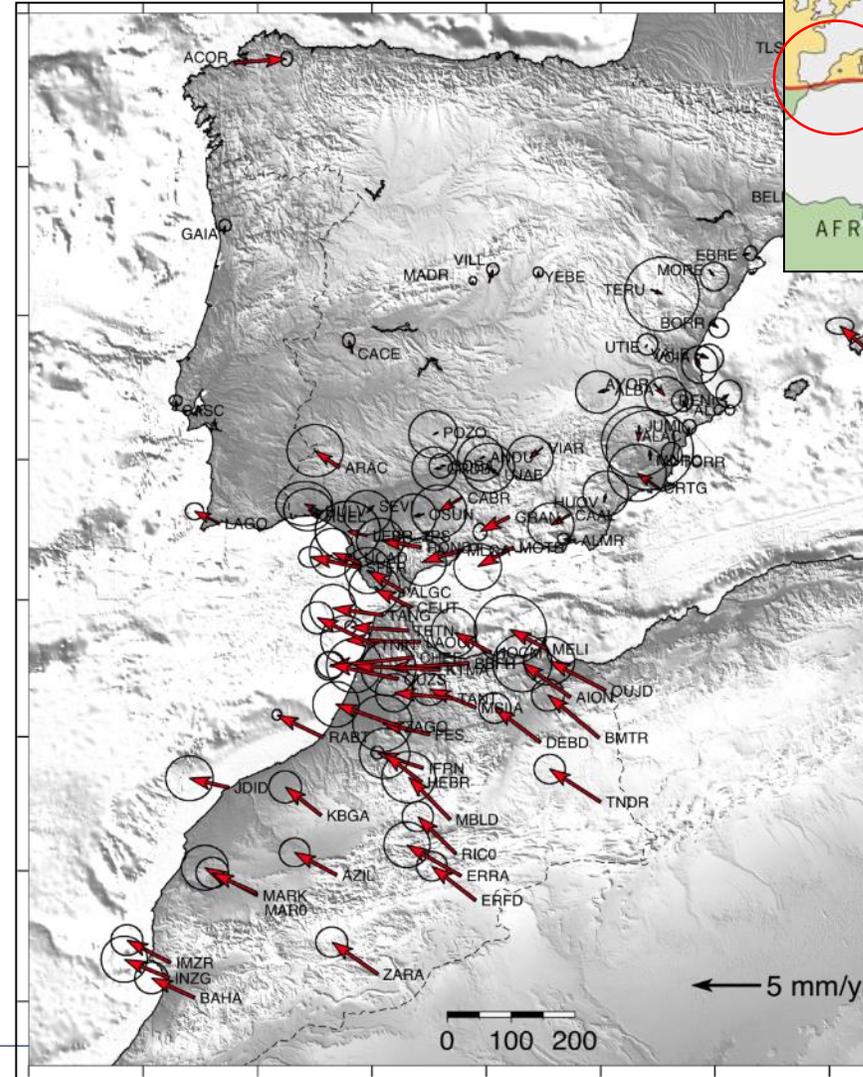
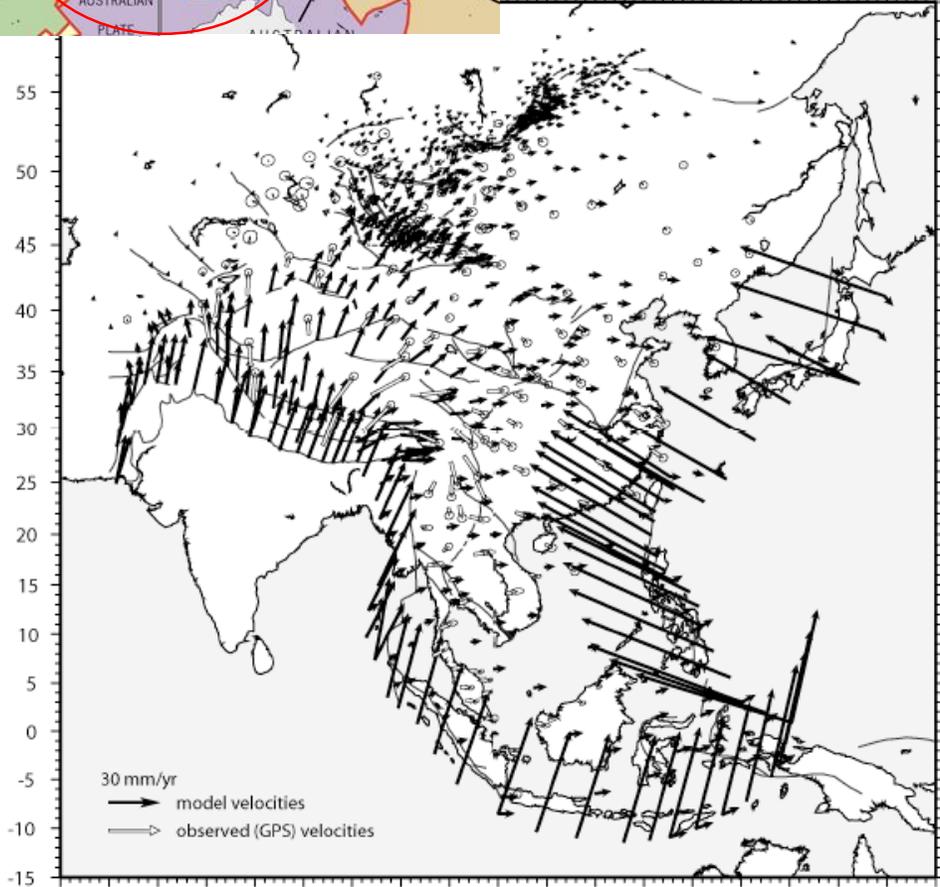
Villegas, 2009: convergenza placche Natza e Sud Americana

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



Campo di velocità a  
larga scala in Asia  
(confronto dati reali  
e modello)

110 120 130 140 150



Mediterraneo  
occidentale

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

Osservazioni e campioni presi sulla superficie

Studio dei terremoti e della propagazione delle onde sismiche

Analisi geochimiche di campioni provenienti dalla Terra e dai meteoriti

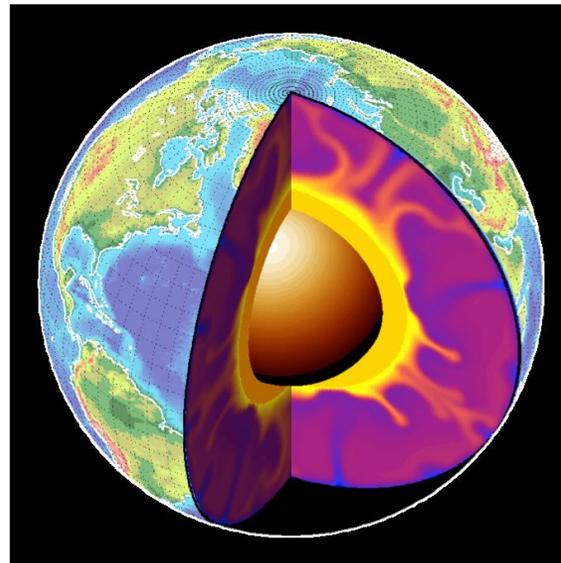
Misura e analisi del campo gravimetrico e magnetico

Esperimenti sui minerali ad alte pressioni e temperature

Modelli numerici della dinamica dei flussi interni alla Terra

Primi principi (“ab initio”) calcolo delle proprietà dei materiali

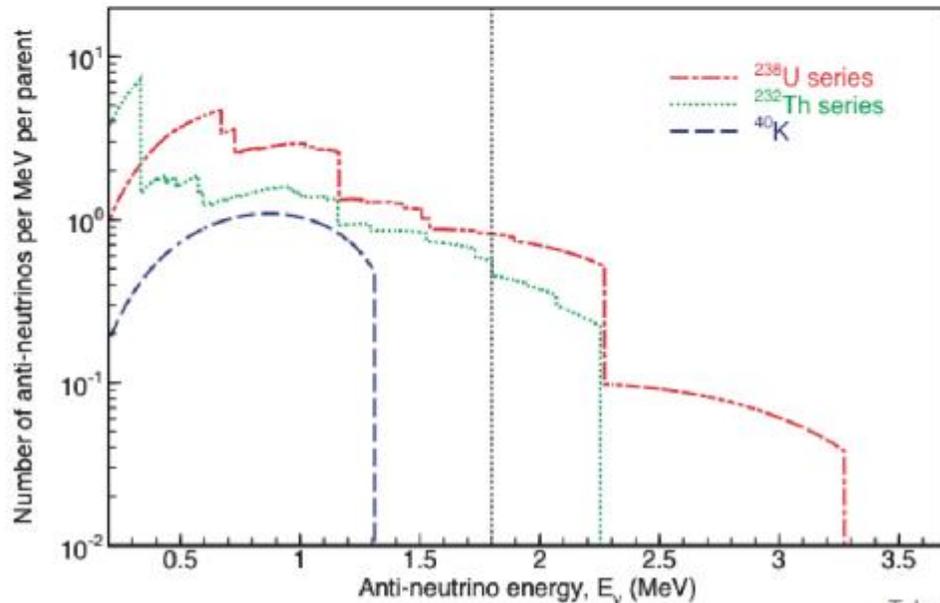
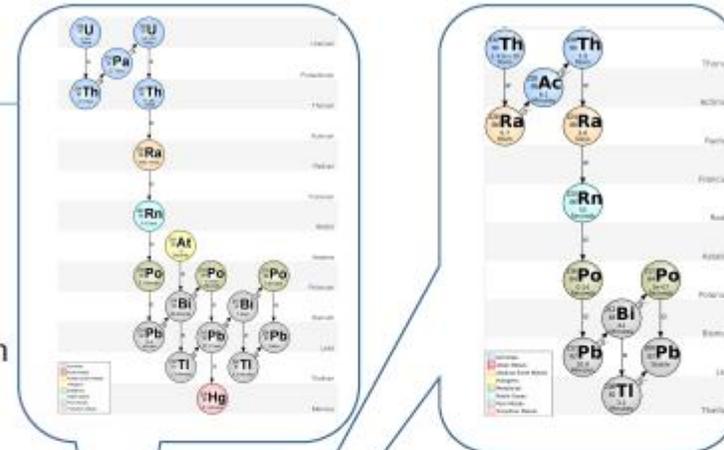
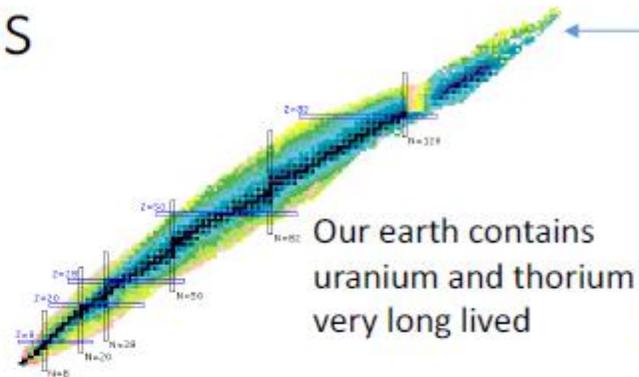
Esperimenti in laboratorio di meccanica dei fluidi



Individuazione dei geo-neutrini:  
“geoscienze delle particelle”

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

## Geo-Neutrinos

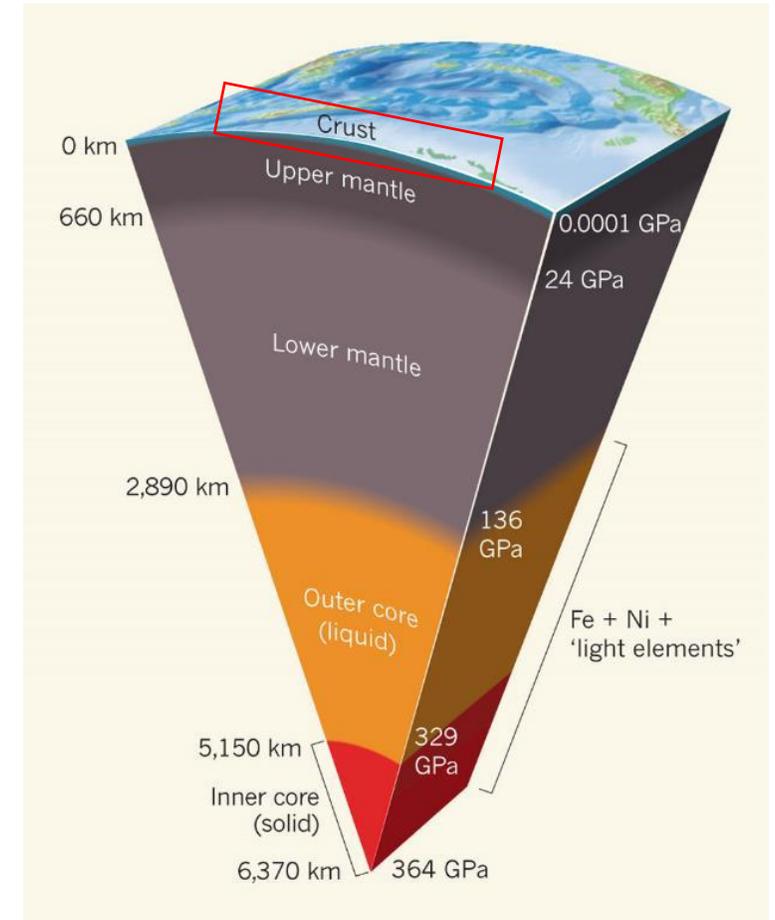


- Geo-neutrinos (mainly from the crust) have been detected by KamLand, Borexino
- They could tell us about geochemical composition of the earth mantle

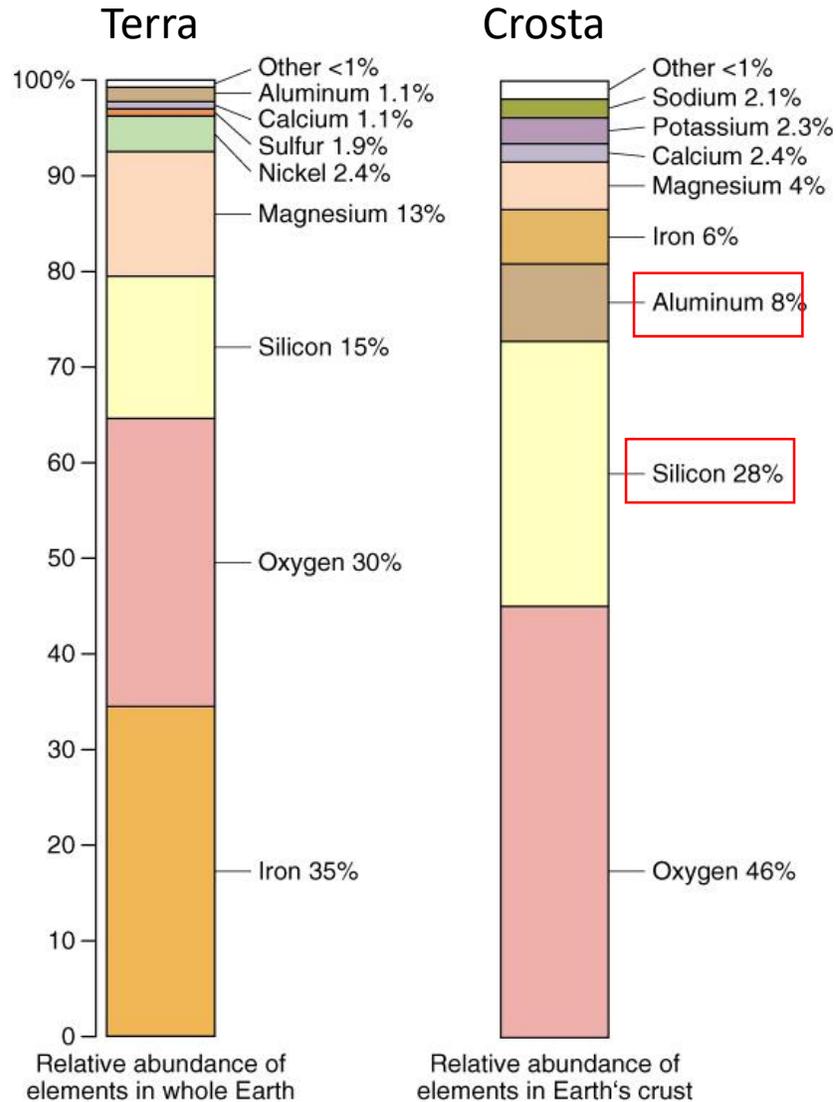
# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

## Composizione:

**Crosta** (ricca di silicio e alluminio, identificata da J.Milne, Lord Reyleig, Lord Rutherford)

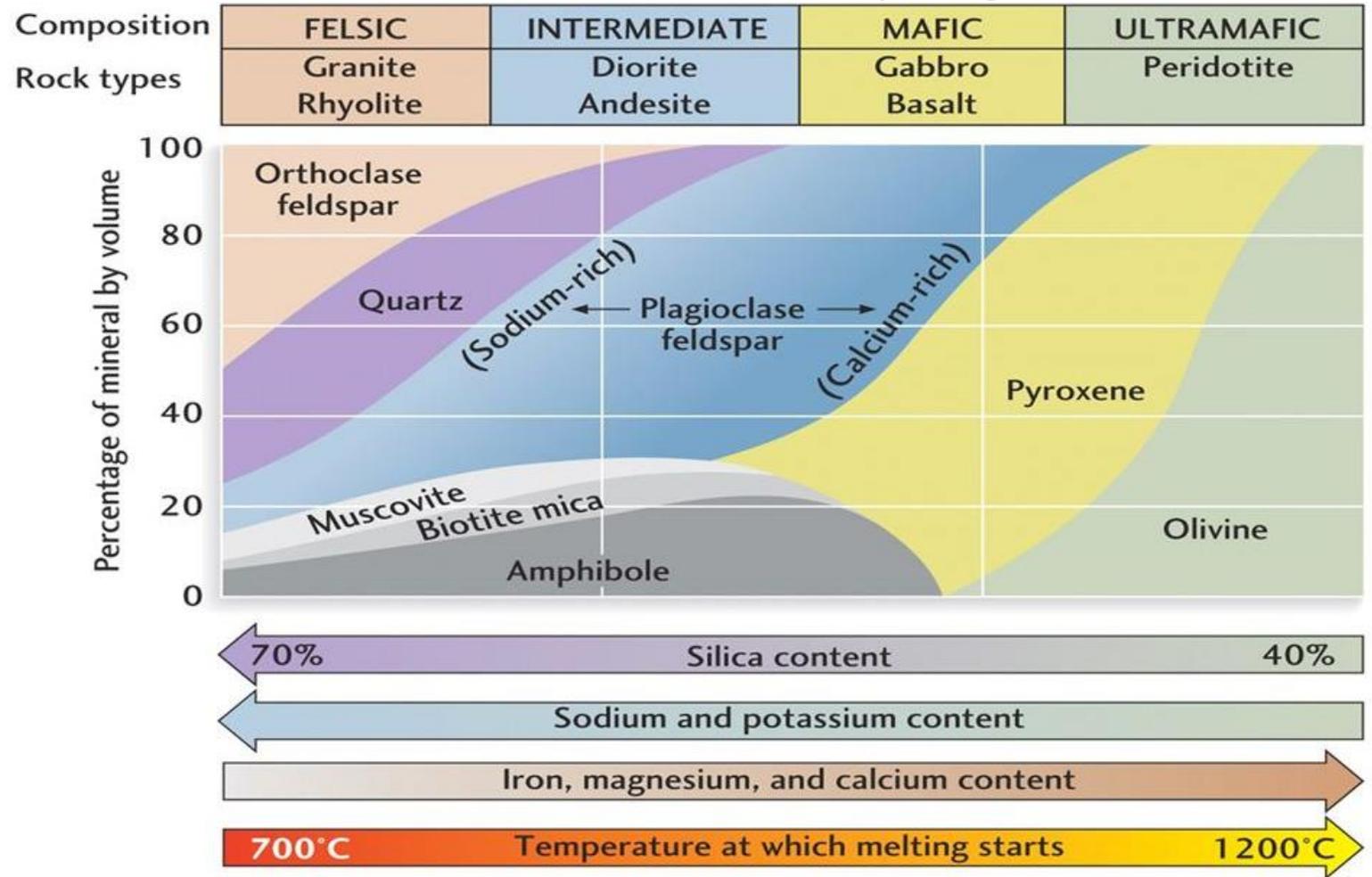


# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

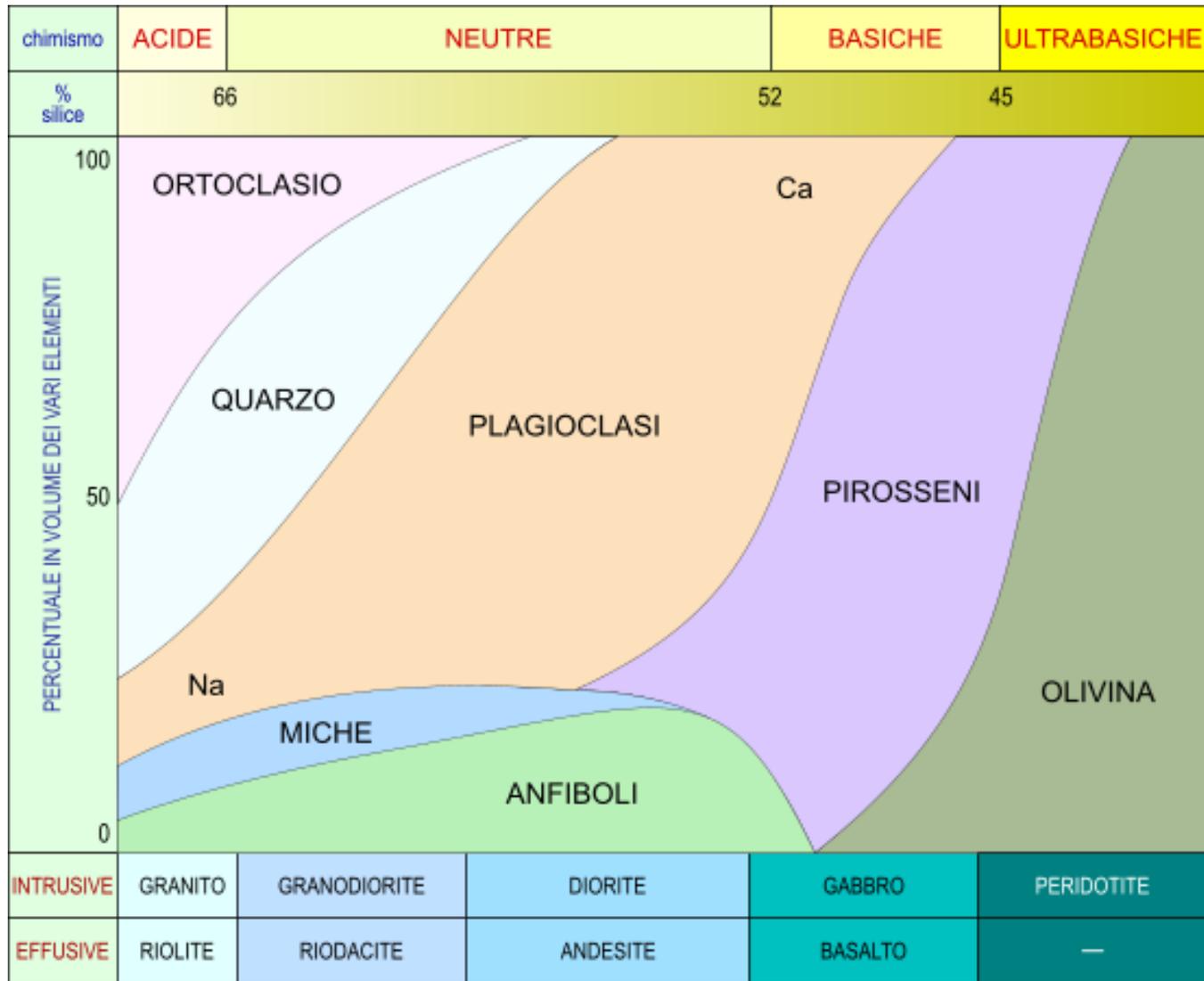


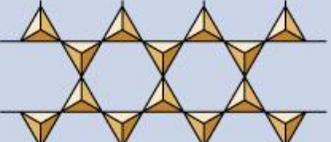
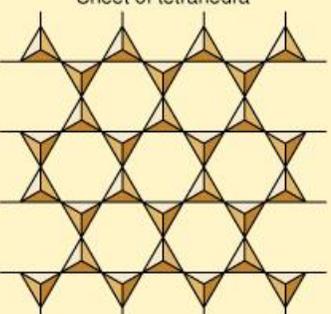
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

## Abbondanza di elementi e tipologie di rocce



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

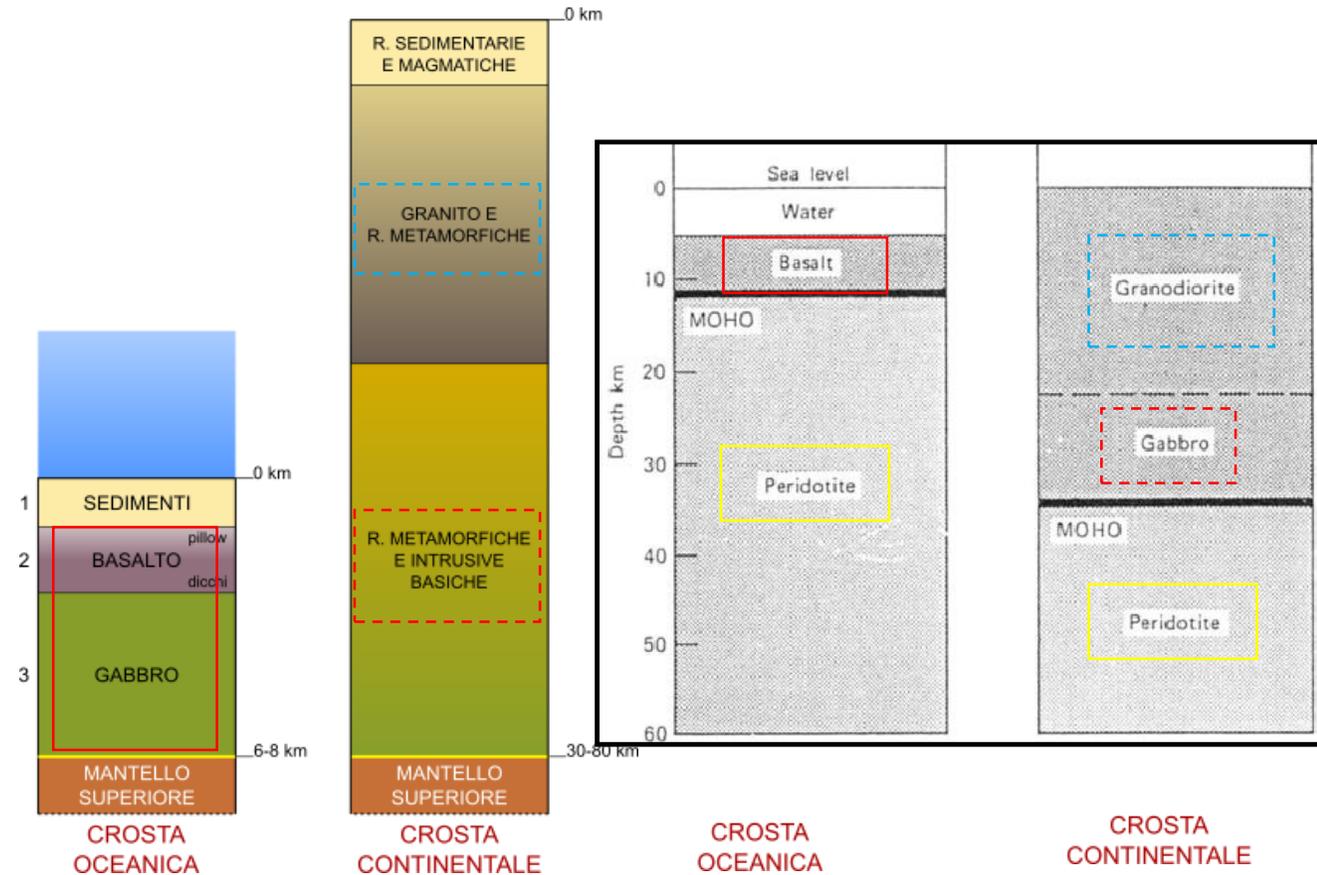
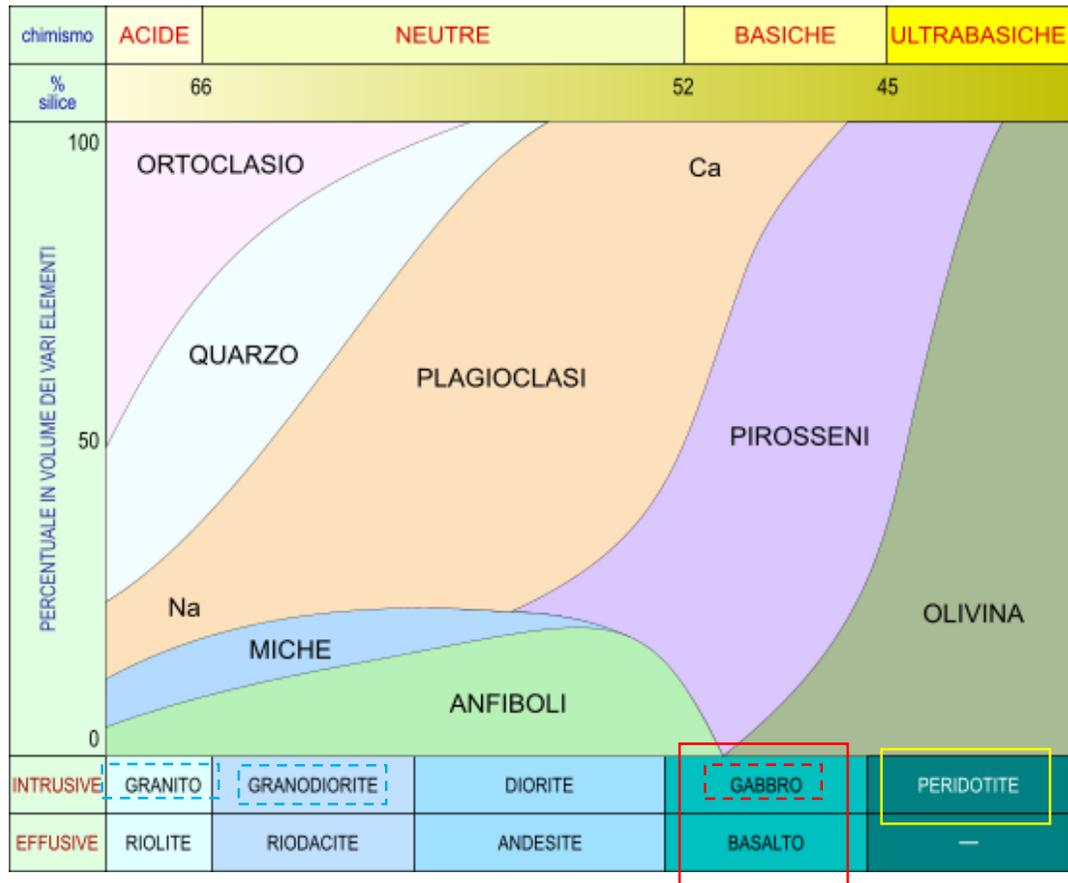


Mineral	Formula	Cleavage	Structure
Olivine	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	None	Isolated tetrahedra 
Garnet	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	None	
Pyroxene	$CaMg(SiO_3)_2$	Two planes at 90°	Chain of tetrahedra 
Amphibole	$Ca_2Mg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2$	Two planes at 120°	Double chain of tetrahedra 
Mica	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	One plane	Sheet of tetrahedra 
Clay	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$		
Feldspar	$KAlSi_3O_8$	Two planes at 90°	Three-dimensional network too complex to be shown by a two-dimensional drawing
Quartz	$SiO_2$	None	

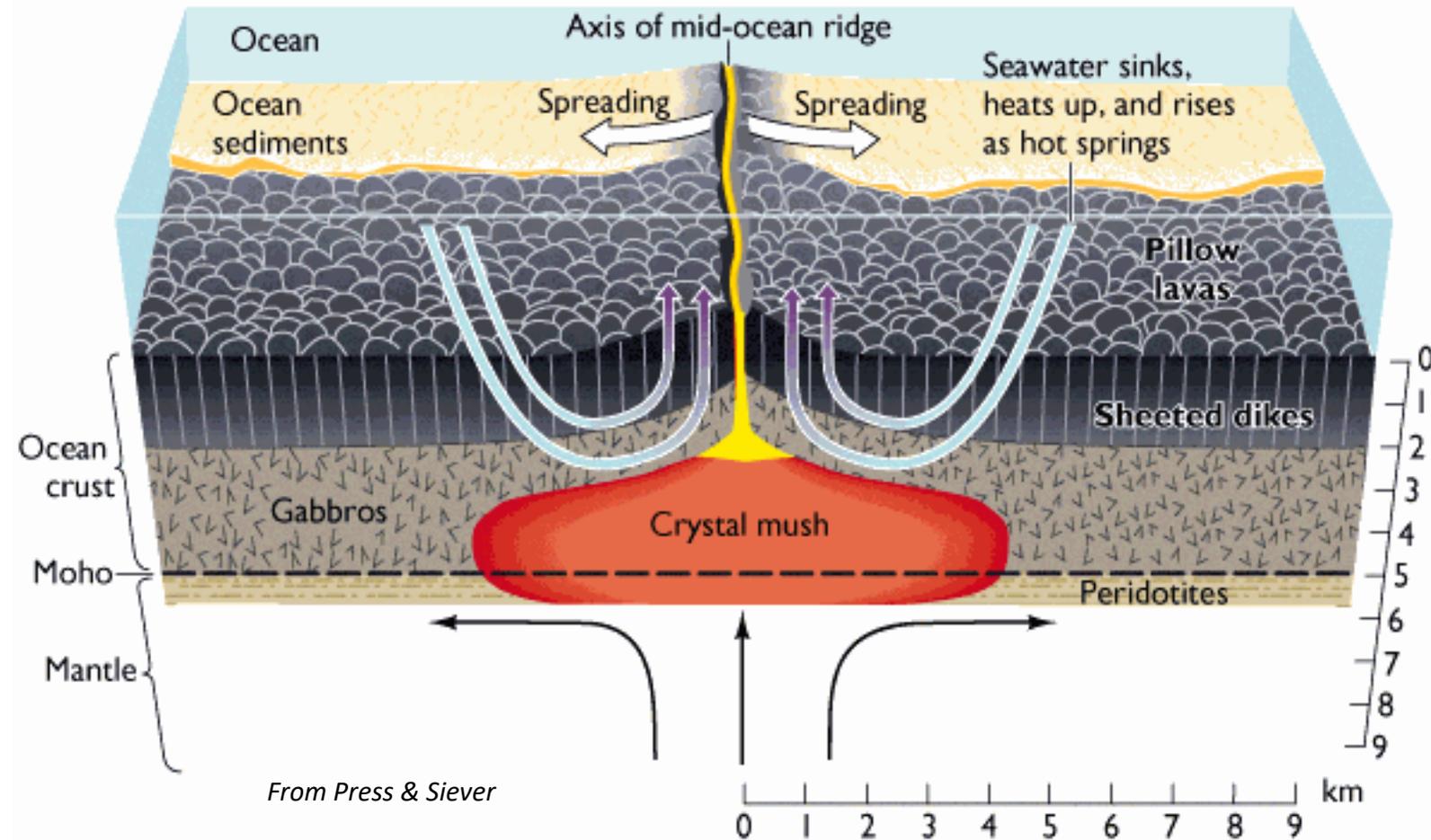
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

Abbondanza di elementi e tipologie di rocce



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



La crosta non si è formata dalla fusione in un solo stadio del mantello, ma sono necessari altri processi quali:

- Accrescimento mediante lastre siliciche fuse
- degrado e alterazione del fondale marino (ritorno preferenziale del Mg al mantello)
- sub-Moho accumulazione di cristalli per precipitazione o per flottazione (cumulates rocks)
- riciclo della crosta inferiore

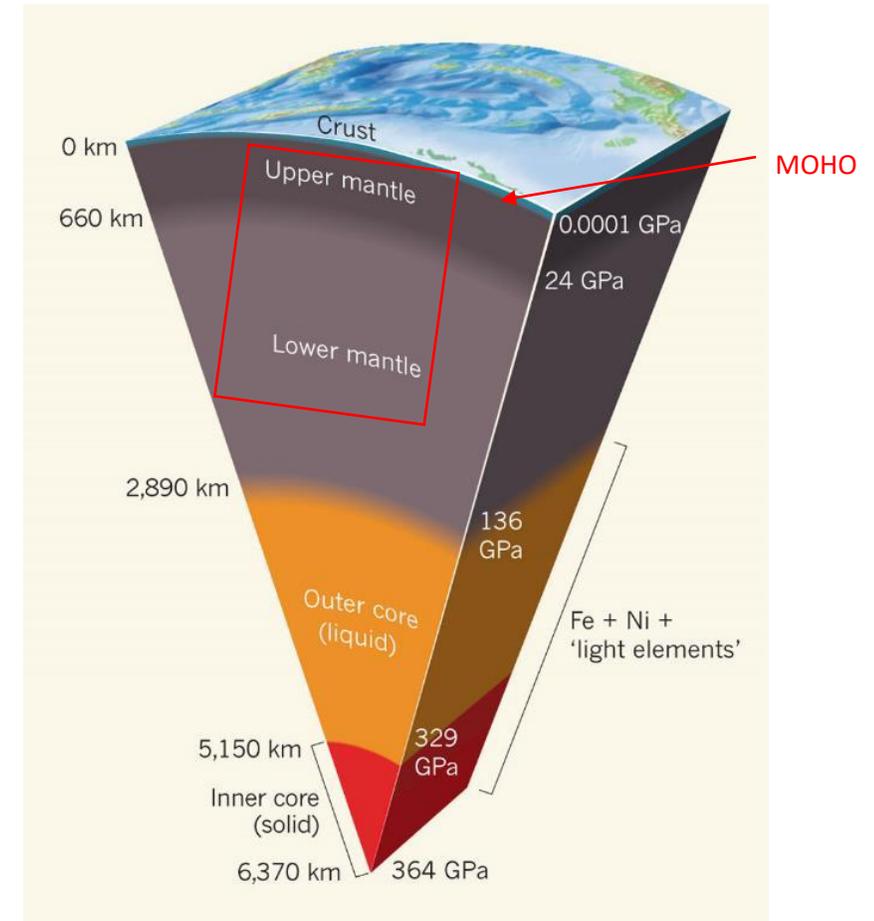
# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

## Composizione:

**Crosta** (ricca di silicio e alluminio, identificata da J. Milne, Lord Reyleig, Lord Rutherford)

**Mantello** (ricco di silicati e magnesio, così chiamato da E. Wiecher)

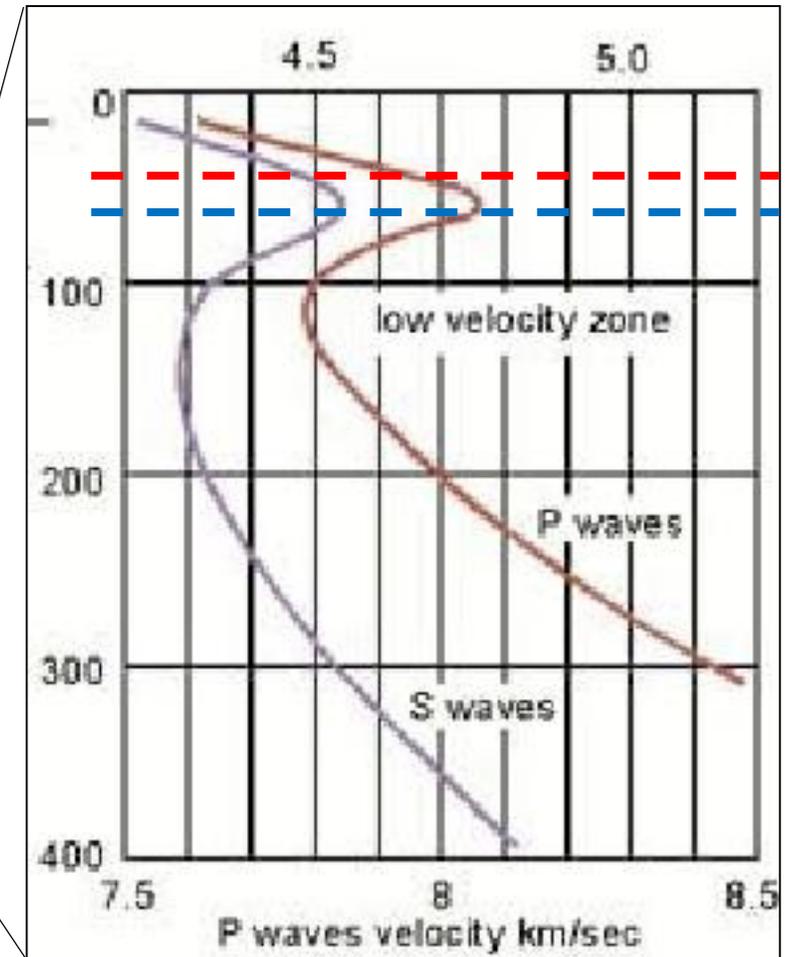
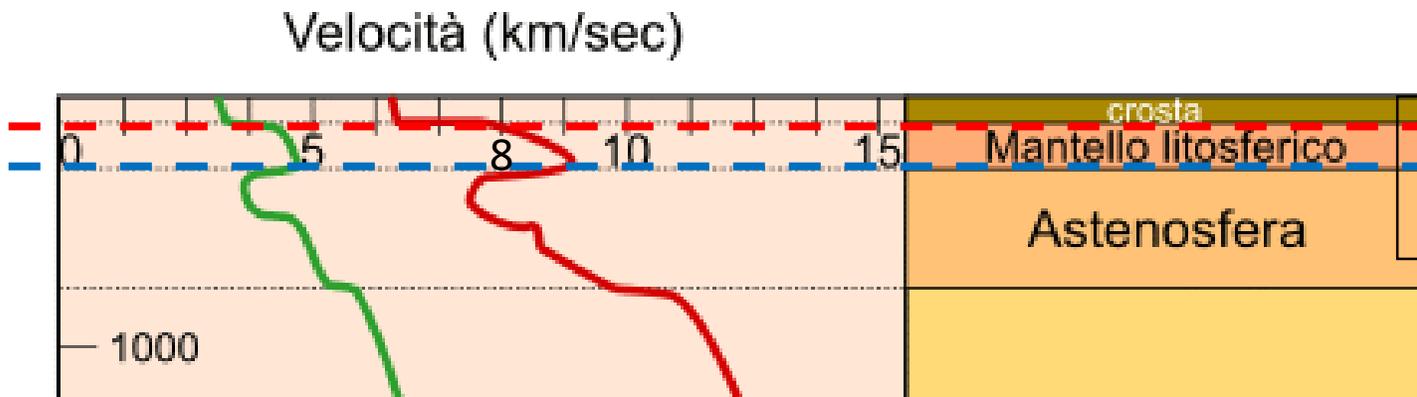
L'interfaccia Crosta/Mantello è detta **MOHO** da A. Mohorovicic che la individuò



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

**MOHO:** le onde P superano gli 8 km/s ed è sia un'interfaccia sismica che fisica (limite crosta/mantello)

**Low Velocity Zone (LVZ):** zona con inversione di velocità che segna l'interfaccia litosfera/astenosfera



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

**MOHO:** le onde P superano gli 8 km/s ed è sia un limite sismica che fisica (limite crosta/mantello)

**Low Velocity Zone (LVZ):** zona con inversione di segno l'interfaccia litosfera/astenosfera  
Meno accentuata in corrispondenza dei rifts continentali o del fondale oceanico

Velocità (km/sec)

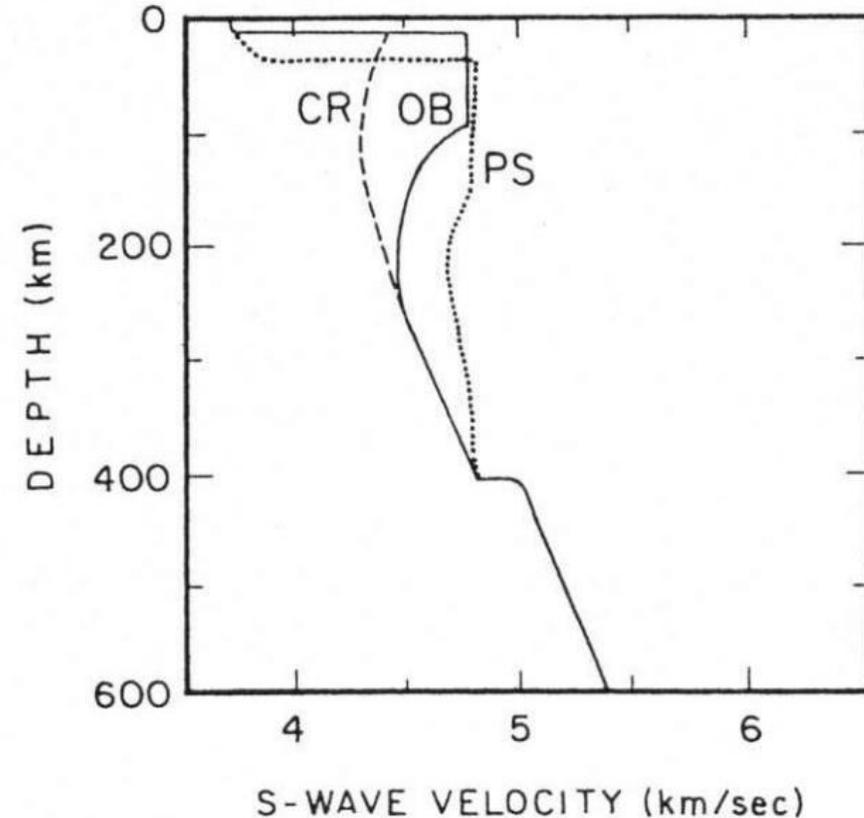
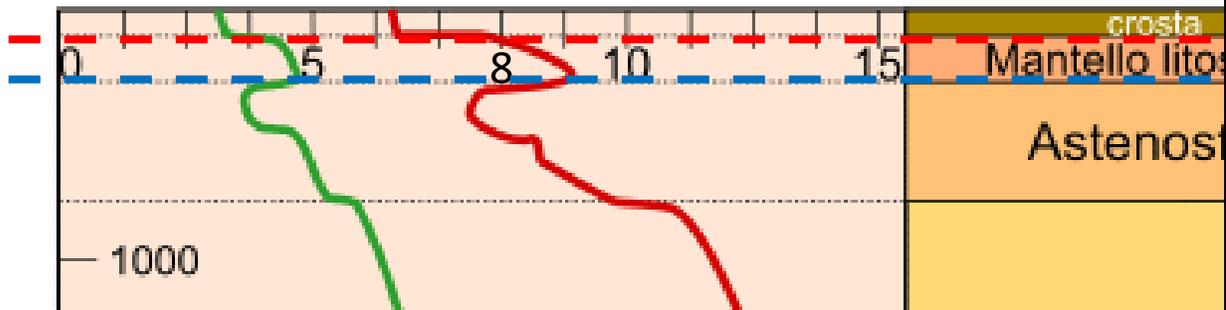


Figure 4.2 S-wave velocity distribution in the upper mantle beneath three crustal types: CR, continental rift; OB, ocean basin; and PS, Proterozoic shield or platform. After Grand and Helmberger (1984).

# Domande iniziali

- È più spessa la crosta oceanica o quella continentale?

E' più spessa la crosta oceanica o quella continentale?

1

Oceanica

42%

5 

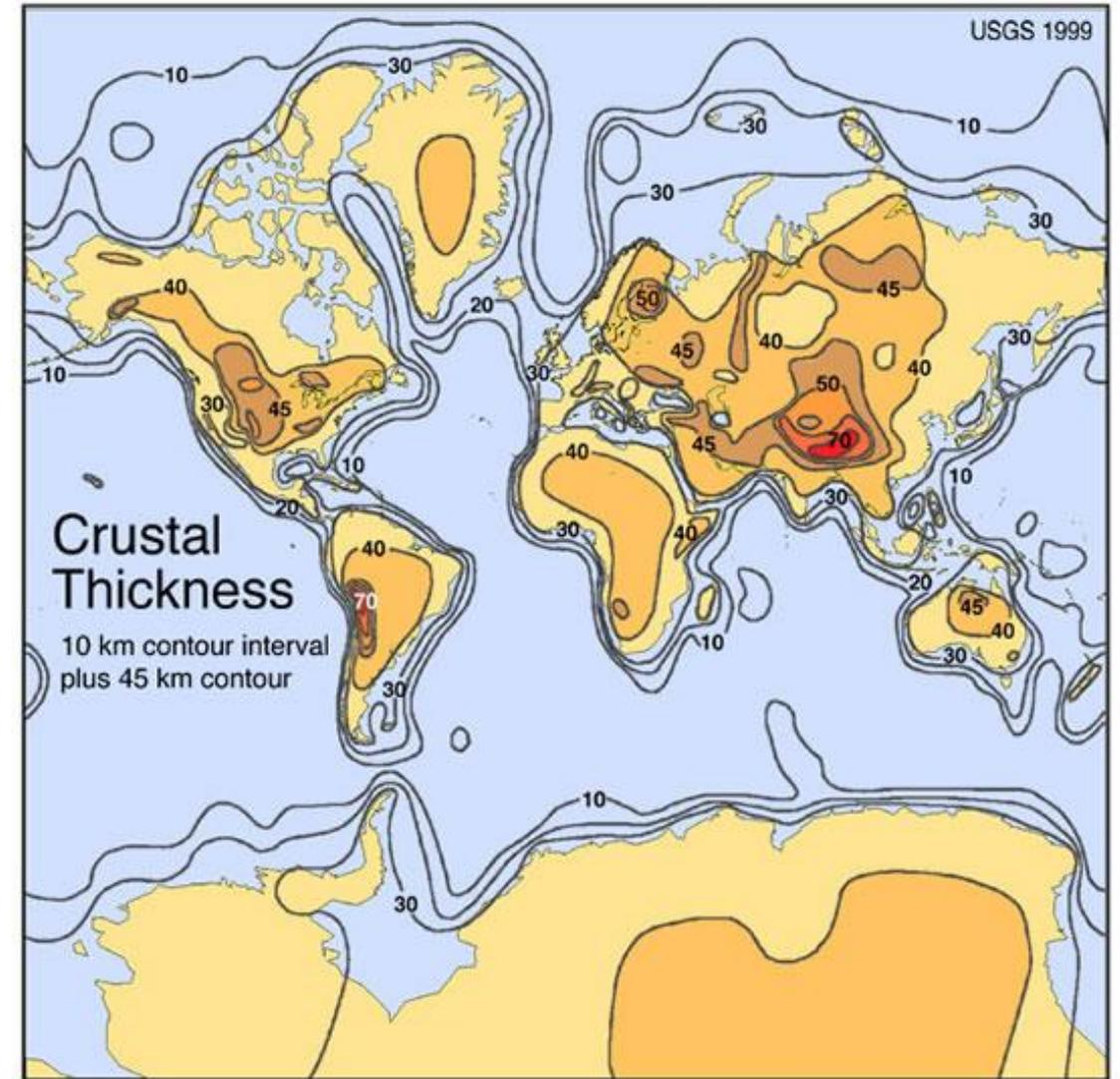
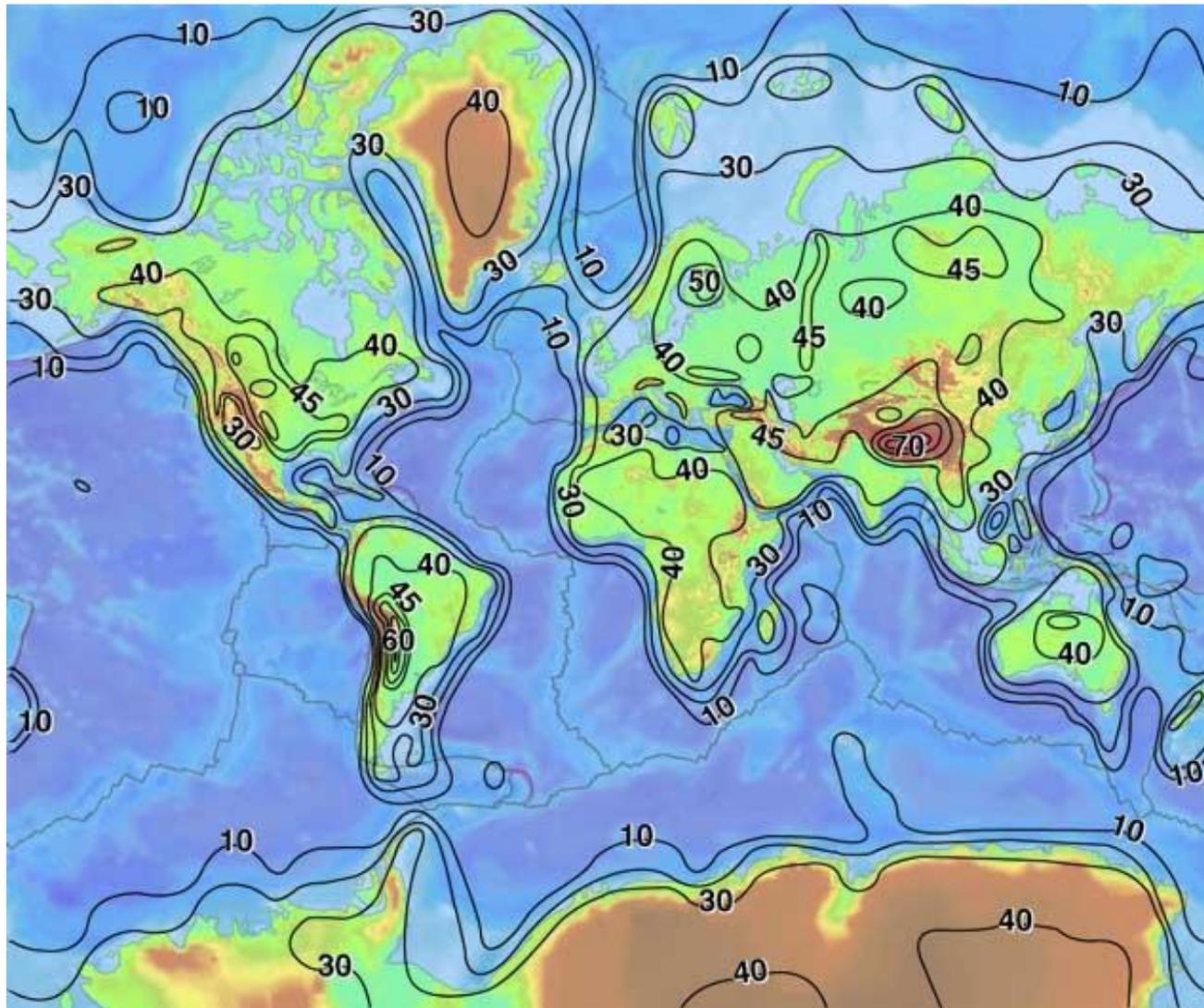
2

Continentale

58%

7 

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



Spessore della crosta e profondità della MOHO

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

## Composizione:

**Crosta** (ricca di silicio e alluminio, identificata da J. Milne, Lord Reyleig, Lord Rutherford)

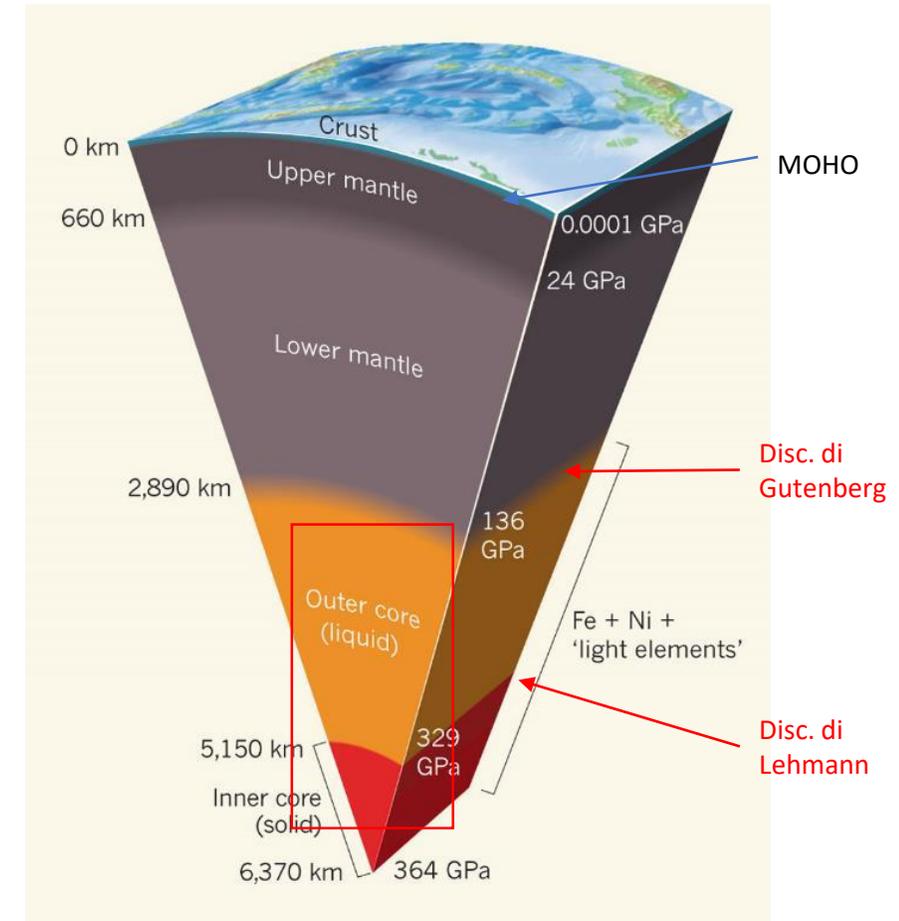
**Mantello** (ricco di silicati e magnesio, così chiamato da E. Wiecher)

L'interfaccia Crosta/Mantello è detta **MOHO** da A. Mohorovicic che la individuò

**Nucleo** (composto da ferro e nickel, scoperto da R.D. Oldham, correttamente definito da B. Gutenberg. Sir H. Jeffreys scoprì che era **liquido** attraverso studi sulle maree mentre I. Lehmann scoprì che la parte più interna è **solida**)

L'interfaccia Mantello/Nucleo è detta **Discontinuità di Gutenberg**  
Al di sopra (tra 100-300 km) di questa discontinuità ne esiste una sismica chiamata **D''**

L'interfaccia nucleo liquido/solido del nucleo è detta **Discontinuità di Lehmann**



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

## Box 1.2 The Seismological Discovery of the Earth's Core

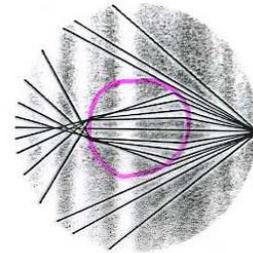
The Constitution of the Interior of the Earth, as Revealed by Earthquakes. By Richard Dixon Oldham, F.G.S. (Read February 21, 1906)

### I. Introductory.

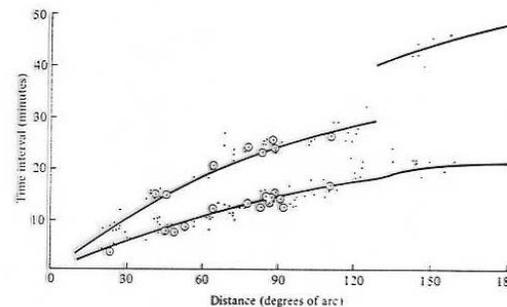
Of all regions of the earth none invites speculation more than that which lies beneath our feet, and in none is speculation more dangerous; yet, apart from speculation, it is little that we can say regarding the constitution of the interior of the earth. We know, with sufficient accuracy for most purposes, its size and shape; we know that its mean density is about  $5\frac{1}{2}$  times that of water, that the density must increase towards the centre, and that the temperature must be high, but beyond these facts little can be said to be known. Many theories of the earth have been propounded at different times: the central substance of the earth has been supposed to be fiery, fluid, solid, and gaseous in turn, till geologists have turned in despair from the subject, and become inclined to confine their attention to the outermost crust of the earth, leaving its centre as a playground for mathematicians.

The object of this paper is not to introduce another speculation, but to point out that the subject is, at least partly, removed from the realm of speculation into that of knowledge by the instrument of research which the modern seismograph has placed in our hands. Just as the spectroscope opened up a new astronomy by enabling the astronomer to determine some of the constituents of which distant stars are composed, so the seismograph, recording the unfelt motion of distant earthquakes, enables us to see into the earth and determine its nature with as great a certainty, up to a certain point, as if we could drive a tunnel through it and take samples of the matter passed through. The subject is yet in its infancy, and much may ultimately be expected of it; already some interesting and unexpected results have come out, which I propose to deal with in this paper.

From R. D. Oldham, "The Constitution of the Interior of the Earth, as Revealed by Earthquakes," *Quarterly Journal, Geological Society*, 62, 456-475, 1906.



Paths of seismic waves through the Earth assuming a core of radius  $0.4R$ , in which the speed is 3 km/sec, while the speed outside it is 6 km/sec. [From Oldham, 1906.]



Time curves of first and second phases of preliminary tremors. The marks surrounded by circles are averages. [From Oldham, 1906.]

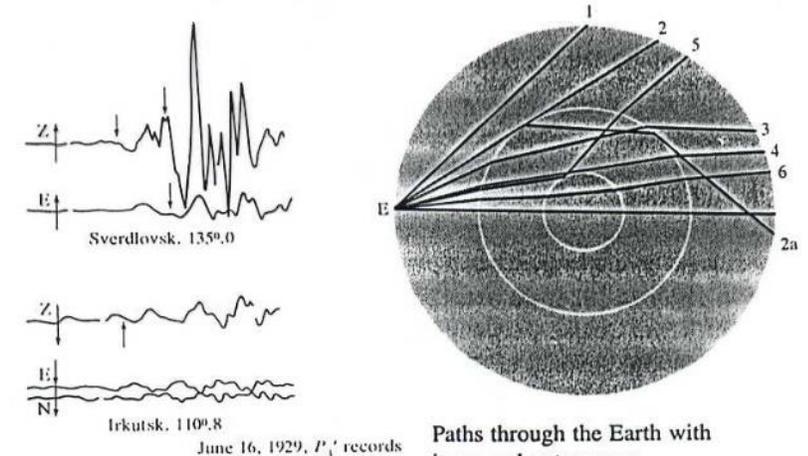
## Box 1.4 The Seismological Discovery of the Earth's Inner Core

$P'$

By I. Lehmann

An explanation of the  $P'_3$  wave is required, since now it can hardly be considered probable that it is due to diffraction. A hypothesis will here be suggested which seems to hold some probability, although it cannot be proved from the data at hand.

We take it that, as before, the earth consists of a core and a mantle, but that inside the core there is an inner core in which the velocity is larger than in the outer one. The radius of the inner core is taken to be  $r_1 = \frac{8}{10} r_0 \sin 16^\circ = 0.2205 r_0$ , so that the ray whose angle of incidence at the surface of the earth is  $16^\circ$  just touches the inner core.



Paths through the Earth with inner and outer cores. [From Lehmann, 1936.]

From I. Lehmann, " $P'$ ," Bureau Central Seismologique International, Series A, *Travaux Scientifique*, 14, 88, 1936.

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

Sezione della Terra basata sulle evidenze sismologiche:

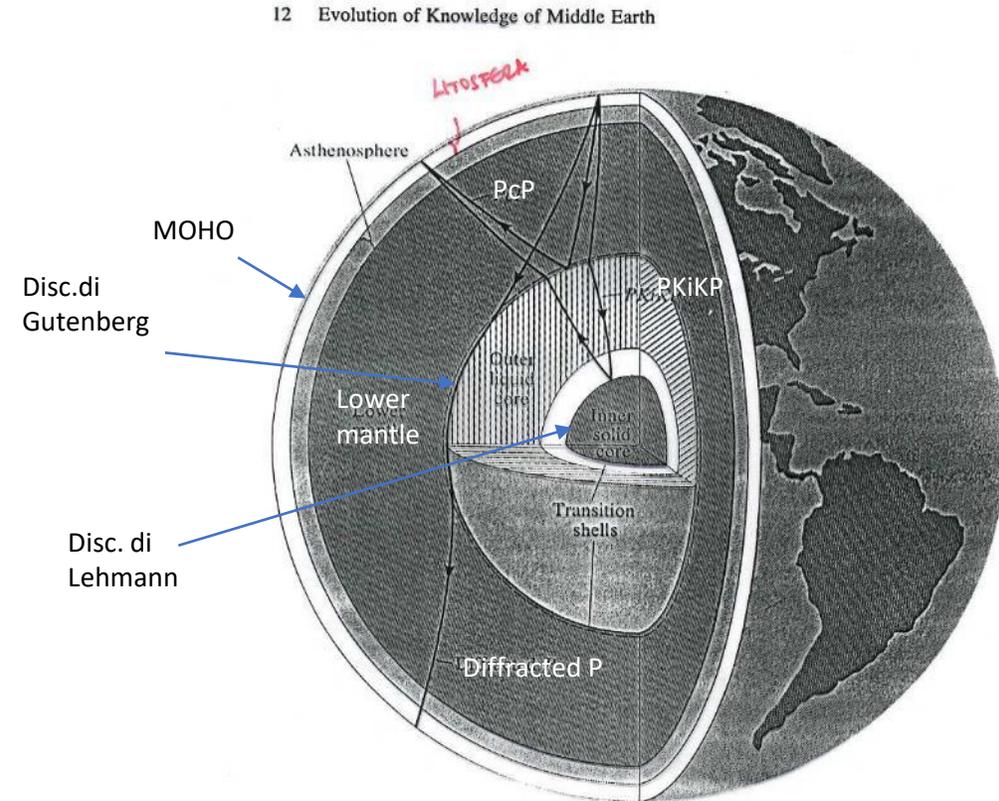
Il **guscio esterno** roccioso ha discontinuità strutturali capaci di riflettere e modificare le onde sismiche.

Al di sotto del mantello la **parte esterna del nucleo** è fluida (mentre il cuore del **nucleo** è **solido** e l'interfaccia è detta discontinuità di Lehmann).

**PcP**: onde riflesse dalla Disc. di Gutenberg

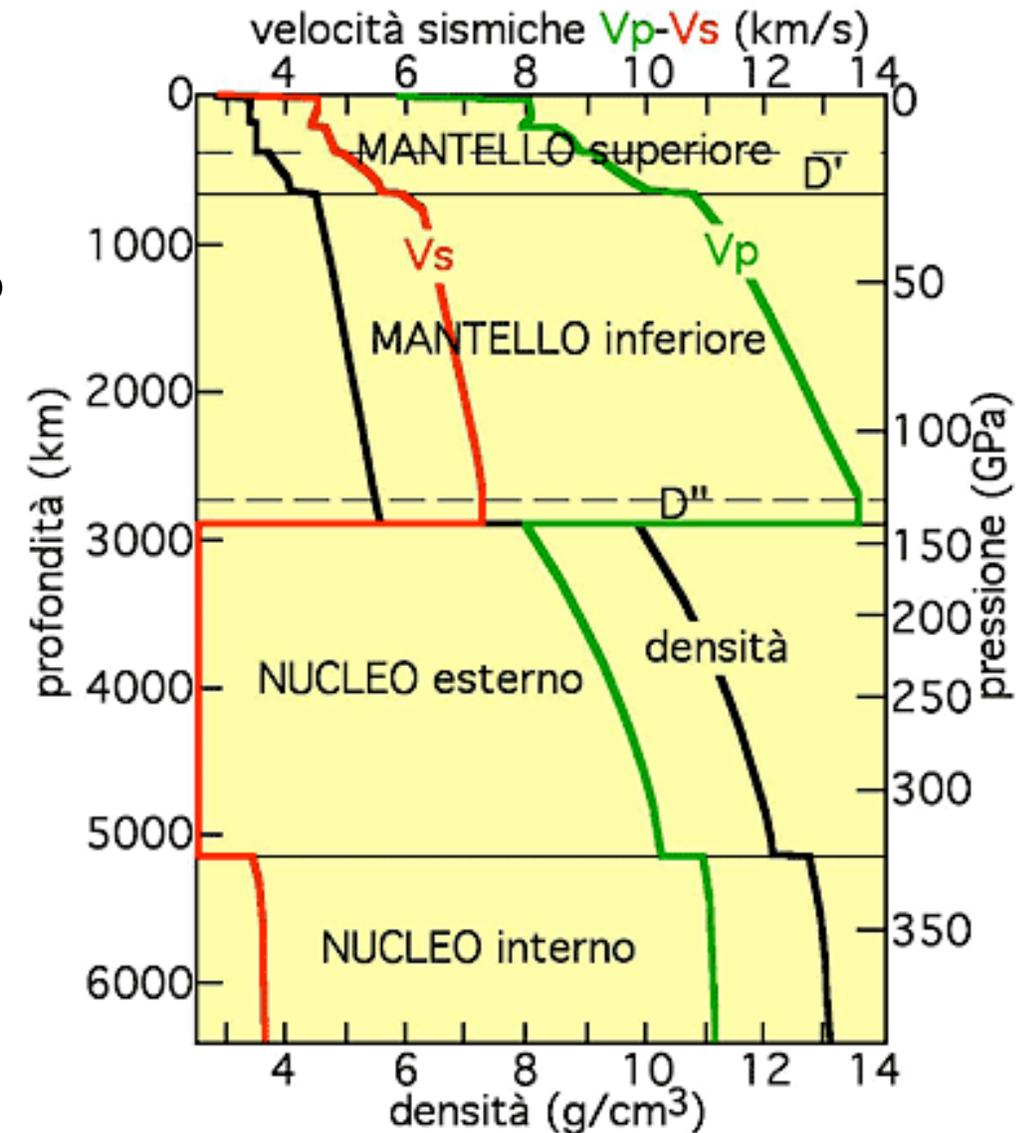
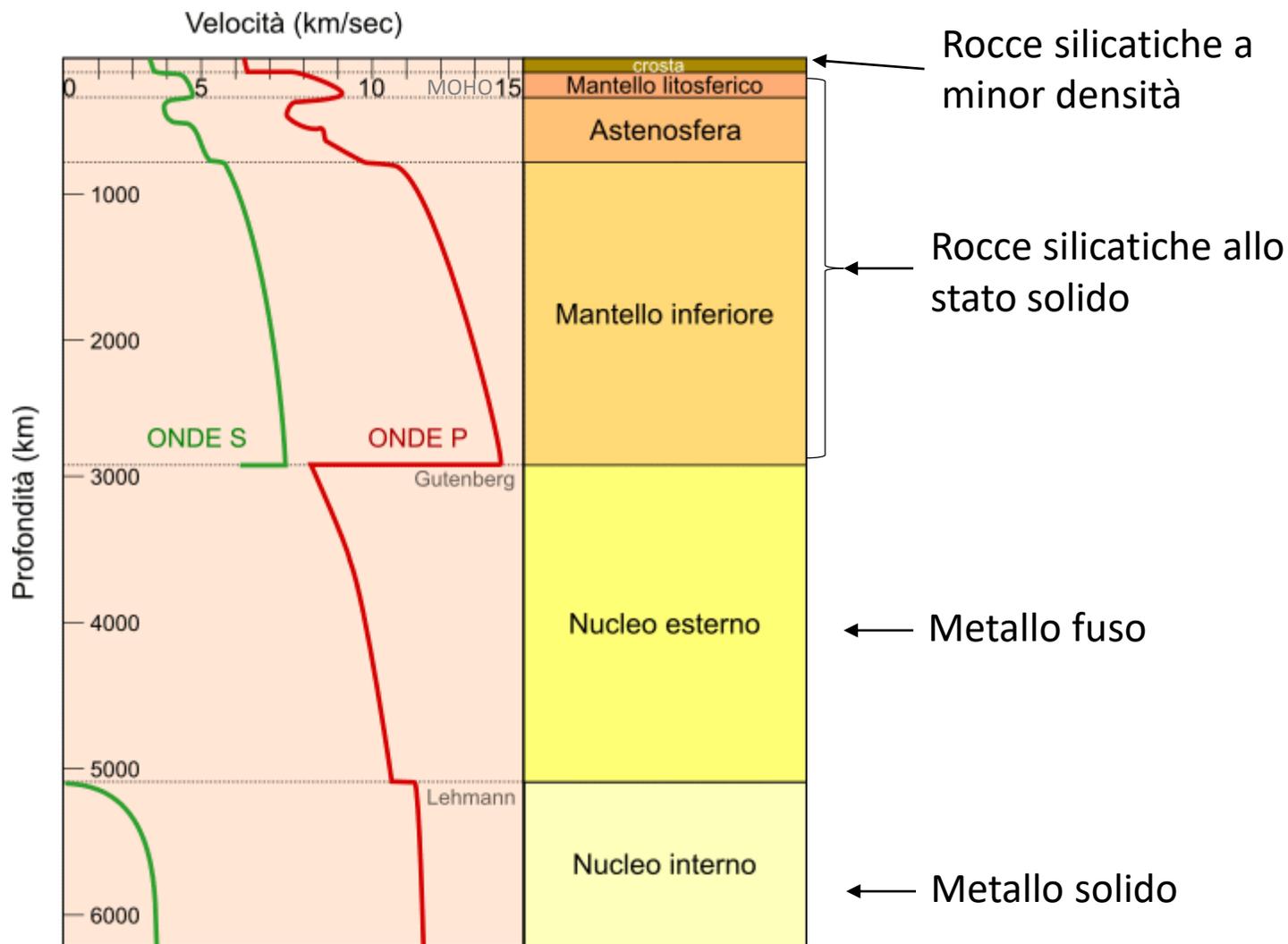
**PKiKP**: onde riflesse dalla Disc. di Lehmann

**P diffratte**: onde che "scivolano" sulla Disc. di Gutenberg

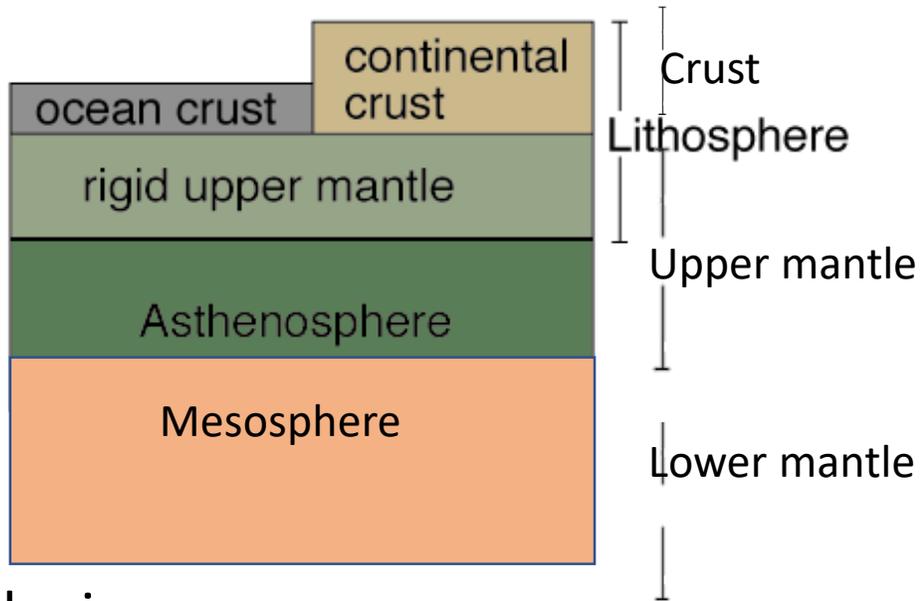


**Figure 1.3** A cross section of the Earth based on the most recent seismological evidence. The outer shell consists of a rocky mantle that has structural discontinuities in its upper part and at its lower boundary that are capable of reflecting or modifying earthquake waves. Below the mantle an outer fluid core surrounds a solid kernel at the Earth's center; between the two is a transition shell. The paths taken by three major kinds of earthquake waves are shown. The waves reflected from the outer liquid core are designated *PcP*; the waves reflected from the inner solid core are *PKiKP*; and the waves that creep around the liquid core are diffracted *P*. [From Bruce A. Bolt, "The Fine Structure of the Earth's Interior." Copyright © 1973 by Scientific American, Inc. All rights reserved.]

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

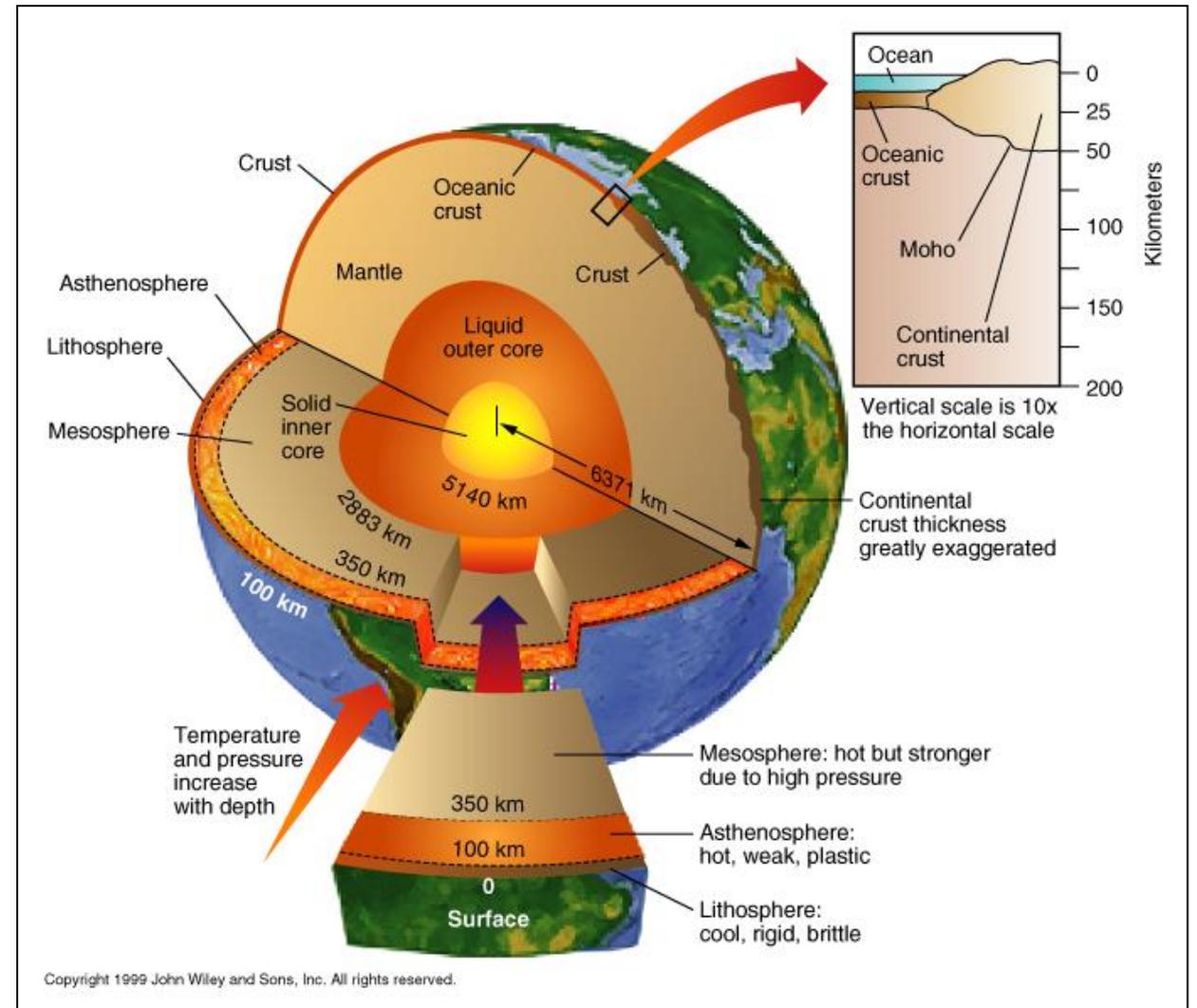


Reologia:

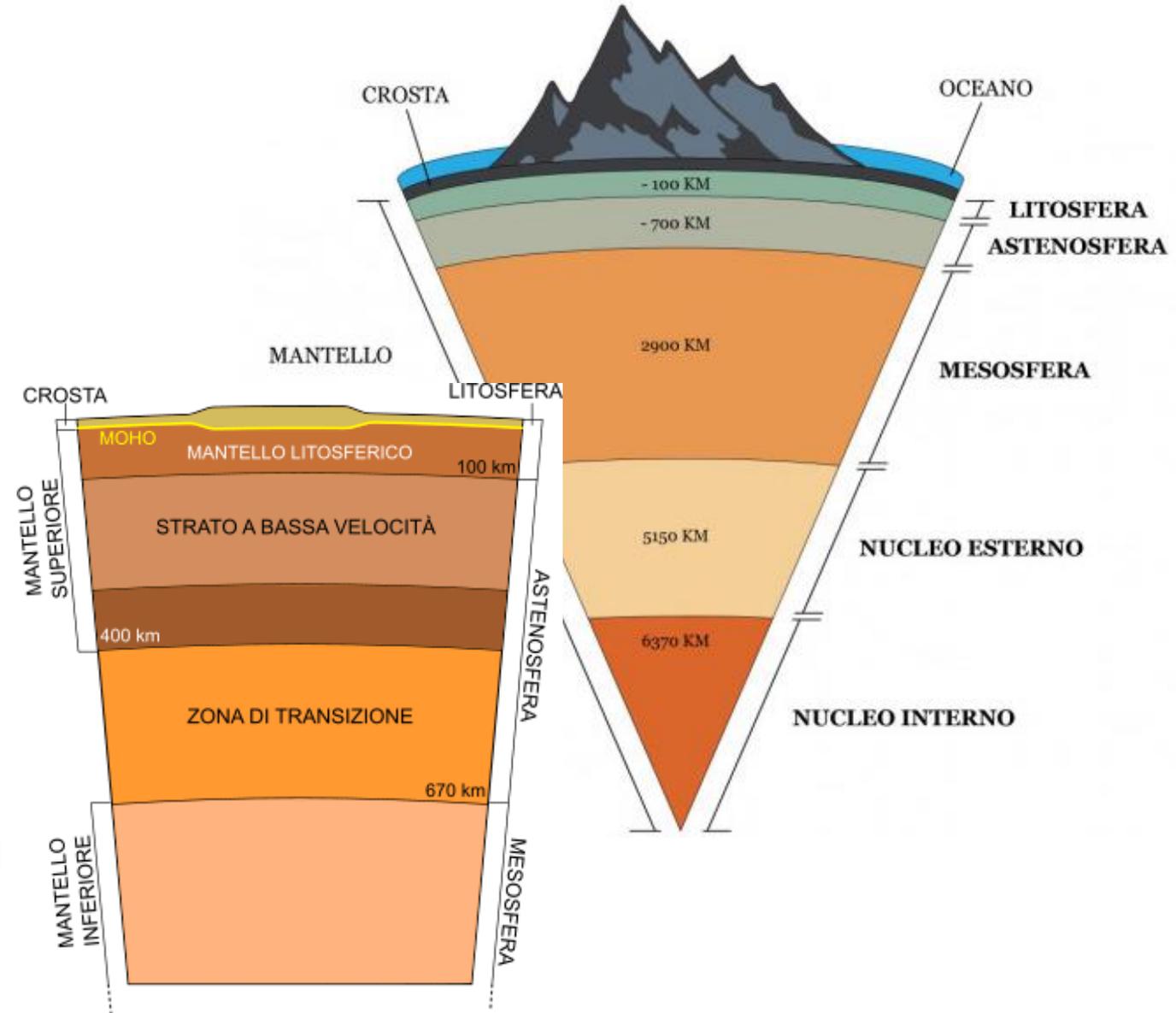
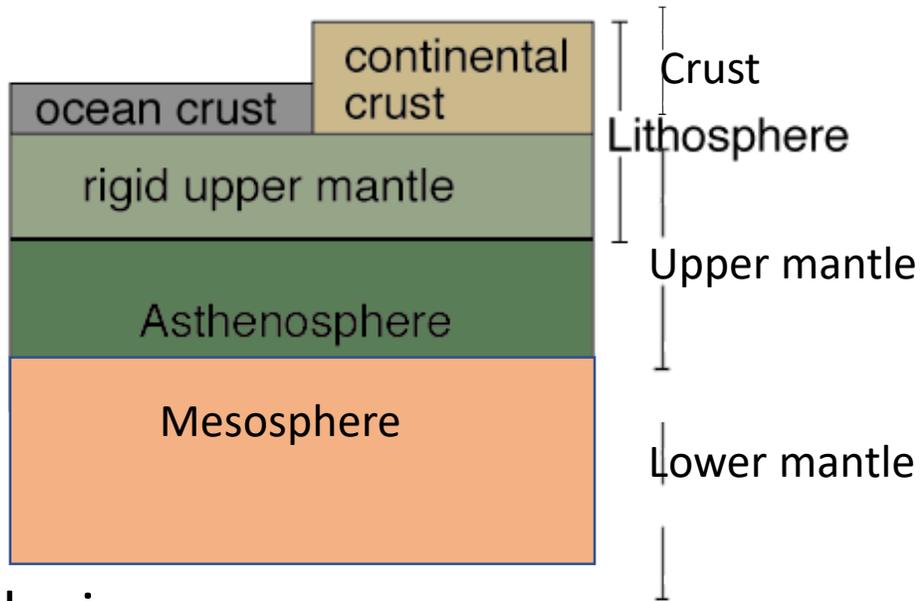
**Litosfera:** si comporta come un corpo rigido, frammentato in porzioni dette placche e in moto reciproco l'una con l'altra

**Astenosfera:** soggetta a deformazioni duttili

**Mesosfera:** si estende da 350 km di profondità fino al nucleo



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra



Reologia:

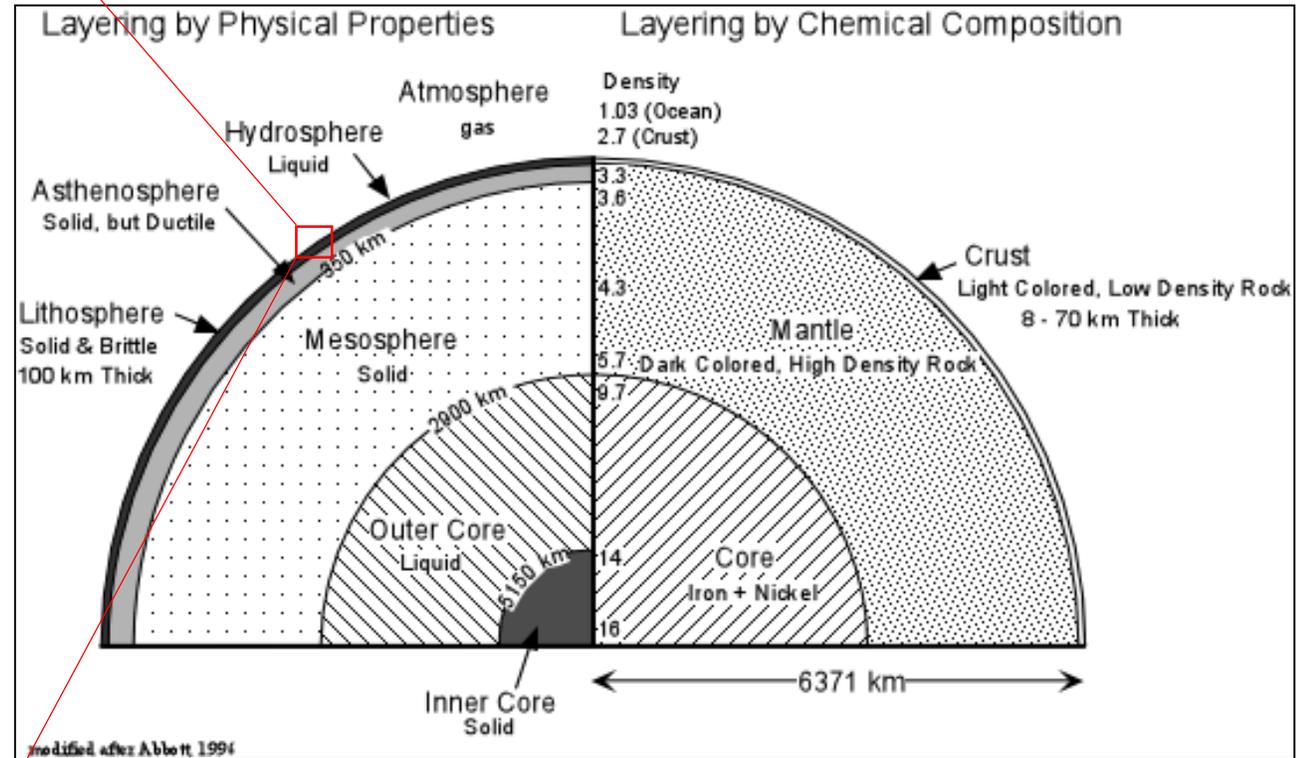
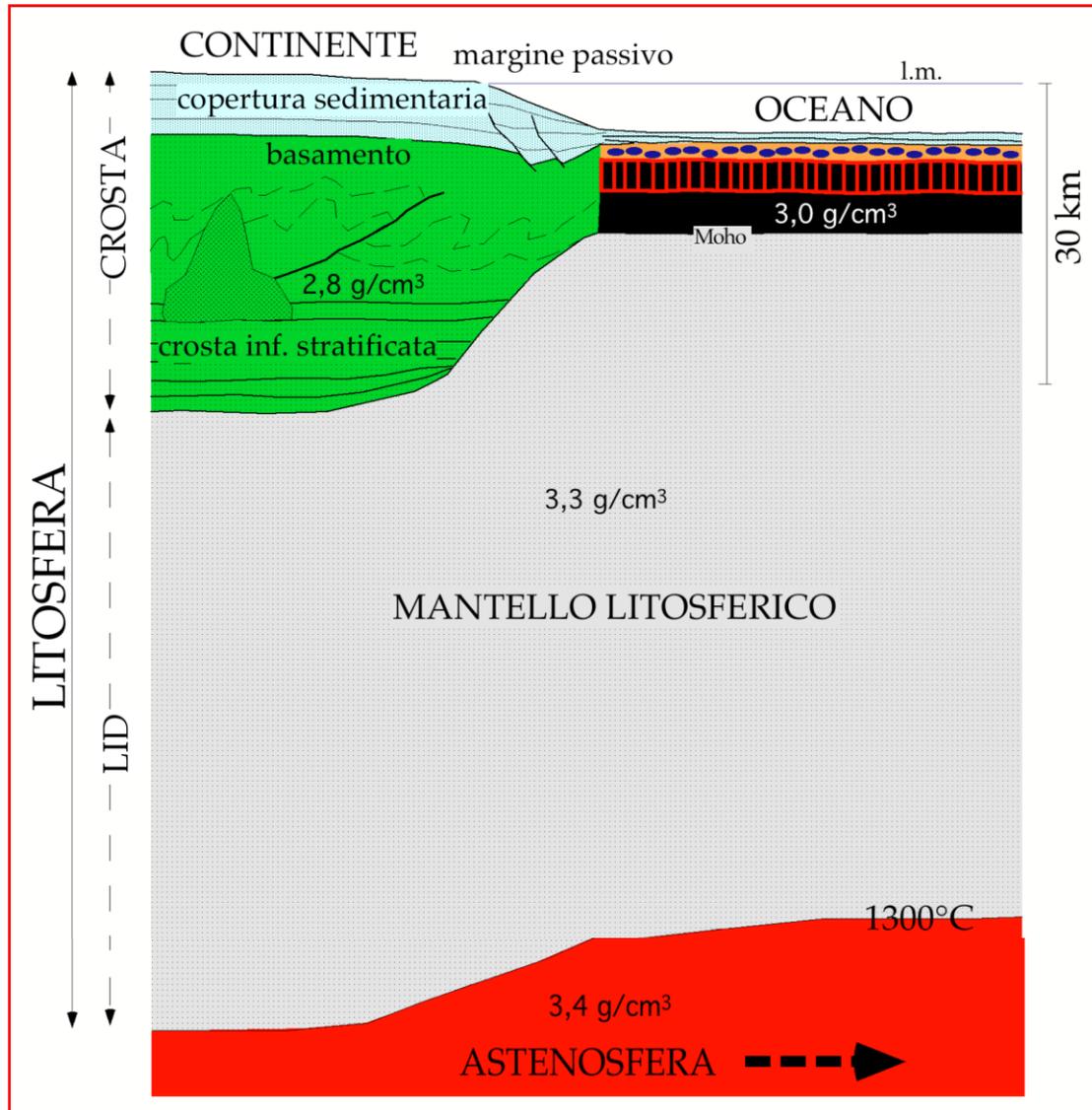
**Litosfera:** si comporta come un corpo rigido, frammentato in porzioni dette placche e in moto reciproco l'una con l'altra

**Astenosfera:** soggetta a deformazioni duttili

**Mesosfera:** si estende da 350 km di profondità fino al nucleo (in alcune rappresentazioni viene posta oltre i 650 km al di sotto di un "zona di transizione facente ancora parte dell'astenosfera")

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

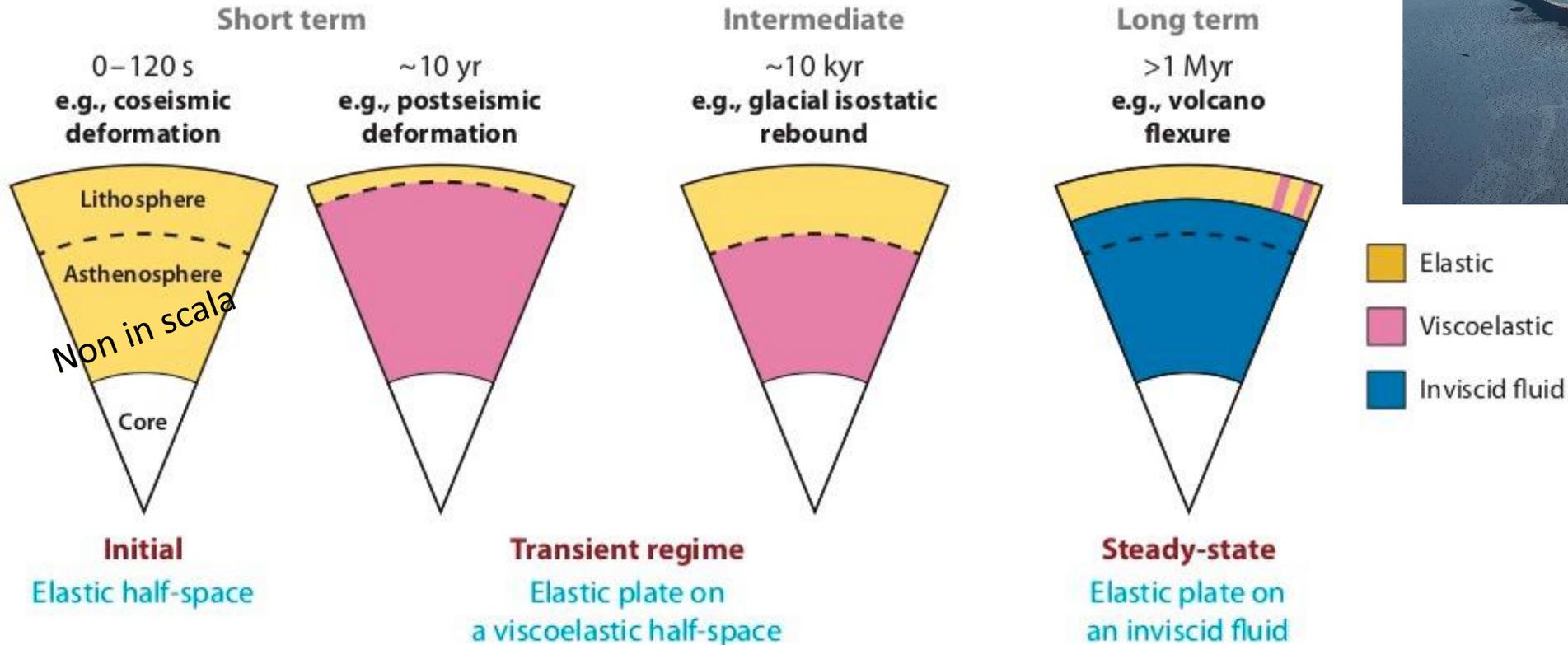
Variazioni di proprietà  
fisiche e chimiche



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

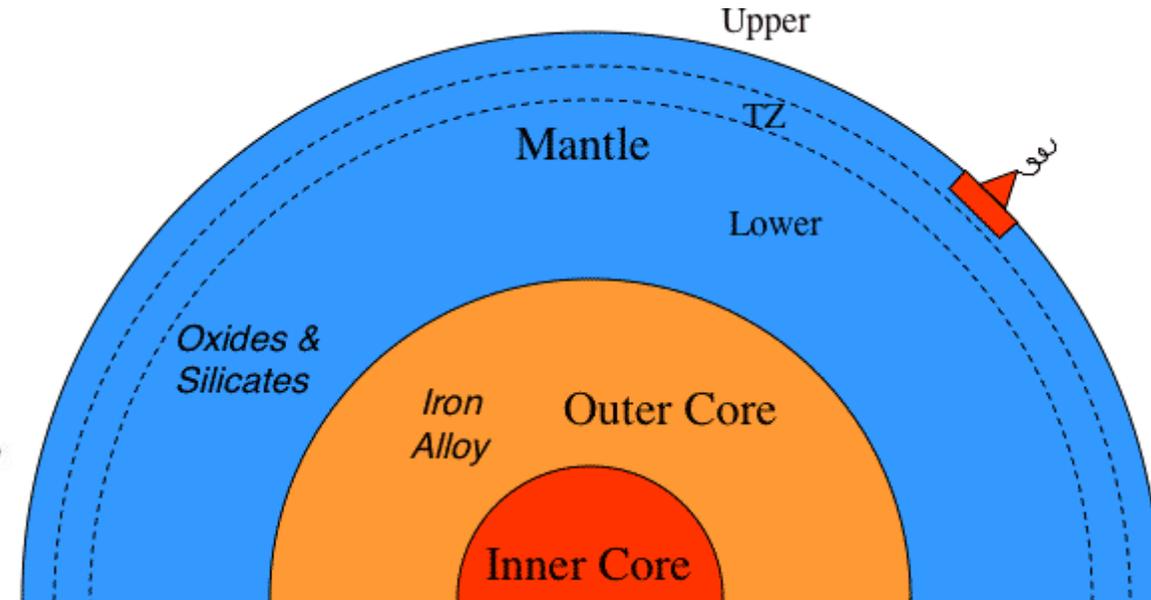
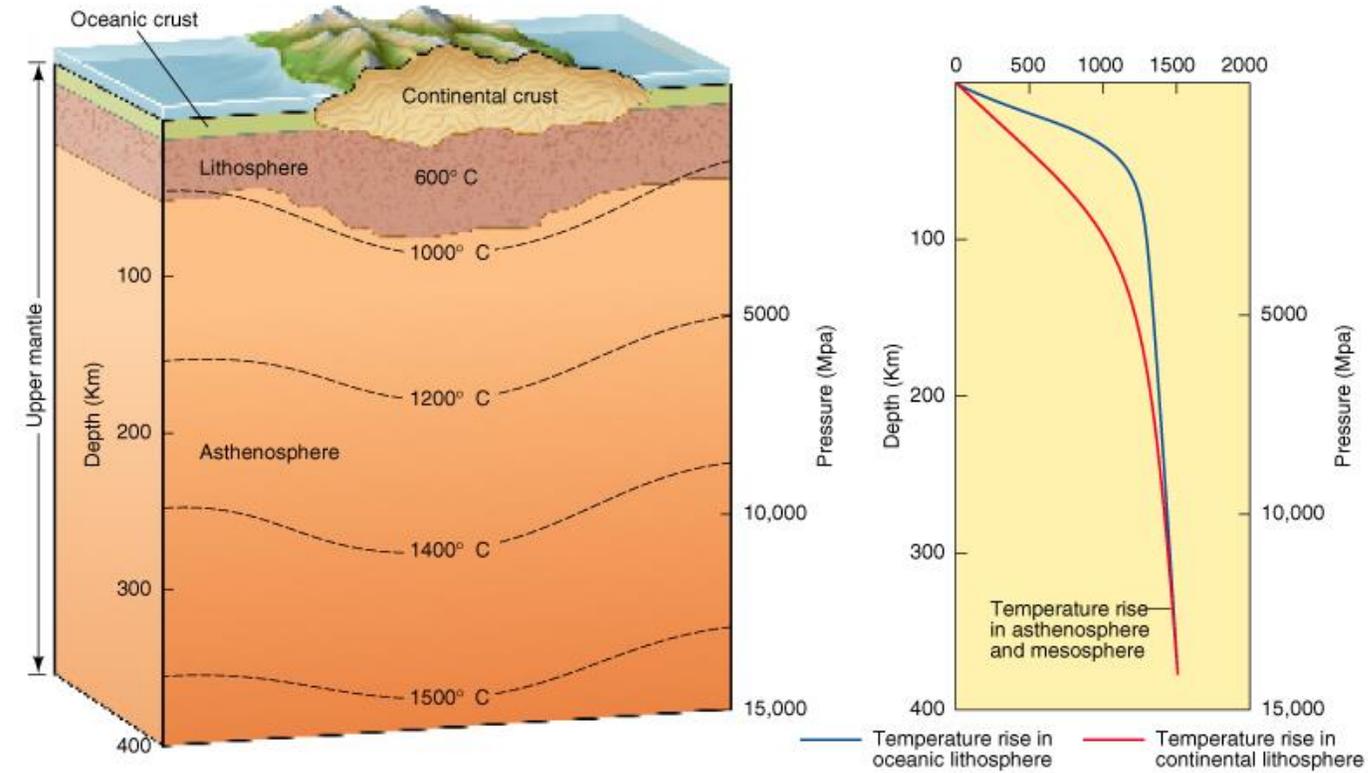
Ma se il mantello è solido, come è possibile che “si comporti come un liquido?”

Analogia acqua/ghiaccio: si comporta come un solido nel breve periodo e come un liquido che fluisce nel lungo periodo



# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

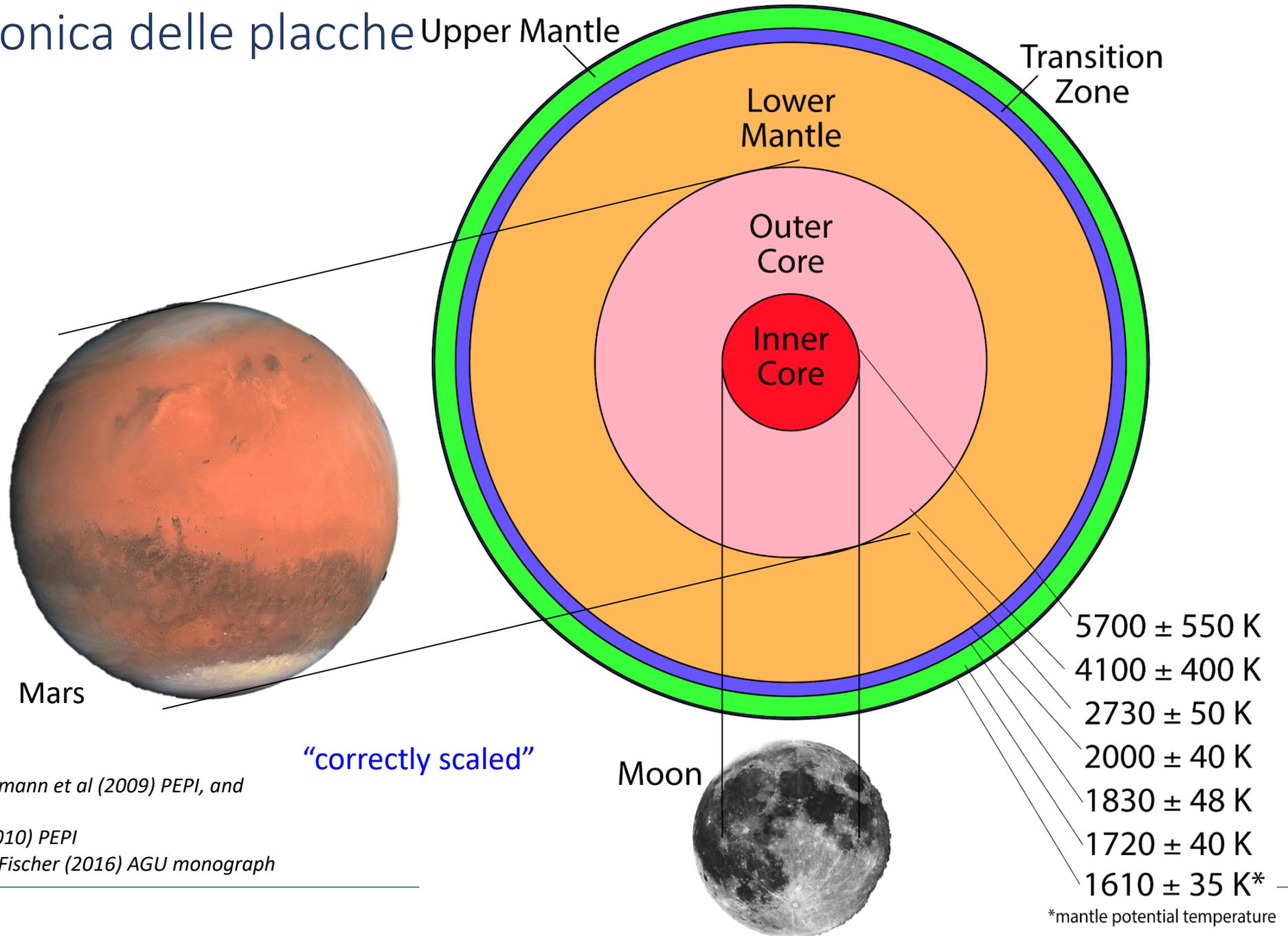
## Variazioni di temperatura



Depth	0	660	2890	5150	6371	km
Pressure	0	24	136	329	363	GPa
Temperature	300	1800	3000	5500	6000	K



# Tettonica delle placche



Mantle potential temperatures: Hirschmann et al (2009) PEPI, and Sarafian et al (2017) Science

Mantle temperatures: Katsura et al (2010) PEPI

Core temperatures: Tsuchiya et al and Fischer (2016) AGU monograph

# Tettonica delle placche: struttura interna della Terra

**Crosta vs mantello:** la crosta è il prodotto del mantello fuso. Il mantello ha un rapporto Mg/Fe maggiore che la crosta ed un minor contenuto di Si e Al

**Litosfera vs astenosfera:** usando come unità di misura le ere geologiche, la litosfera si comporta come un corpo rigido, suddiviso in placche in moto reciproco, mentre l'astenosfera si comporta come un corpo duttile. La litosfera è sia di tipo oceanico che continentale

**Mantello superiore vs mantello inferiore:** la parte della litosfera al di sotto della crosta e l'astenosfera, insieme, formano il mantello superiore, mentre la mesosfera, che si estende fino al nucleo esterno, corrisponde al mantello inferiore



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

# Veronica Pazzi

Dipartimento di Matematica e Geoscienze

[veronica.pazzi@units.it](mailto:veronica.pazzi@units.it)

[www.units.it](http://www.units.it)