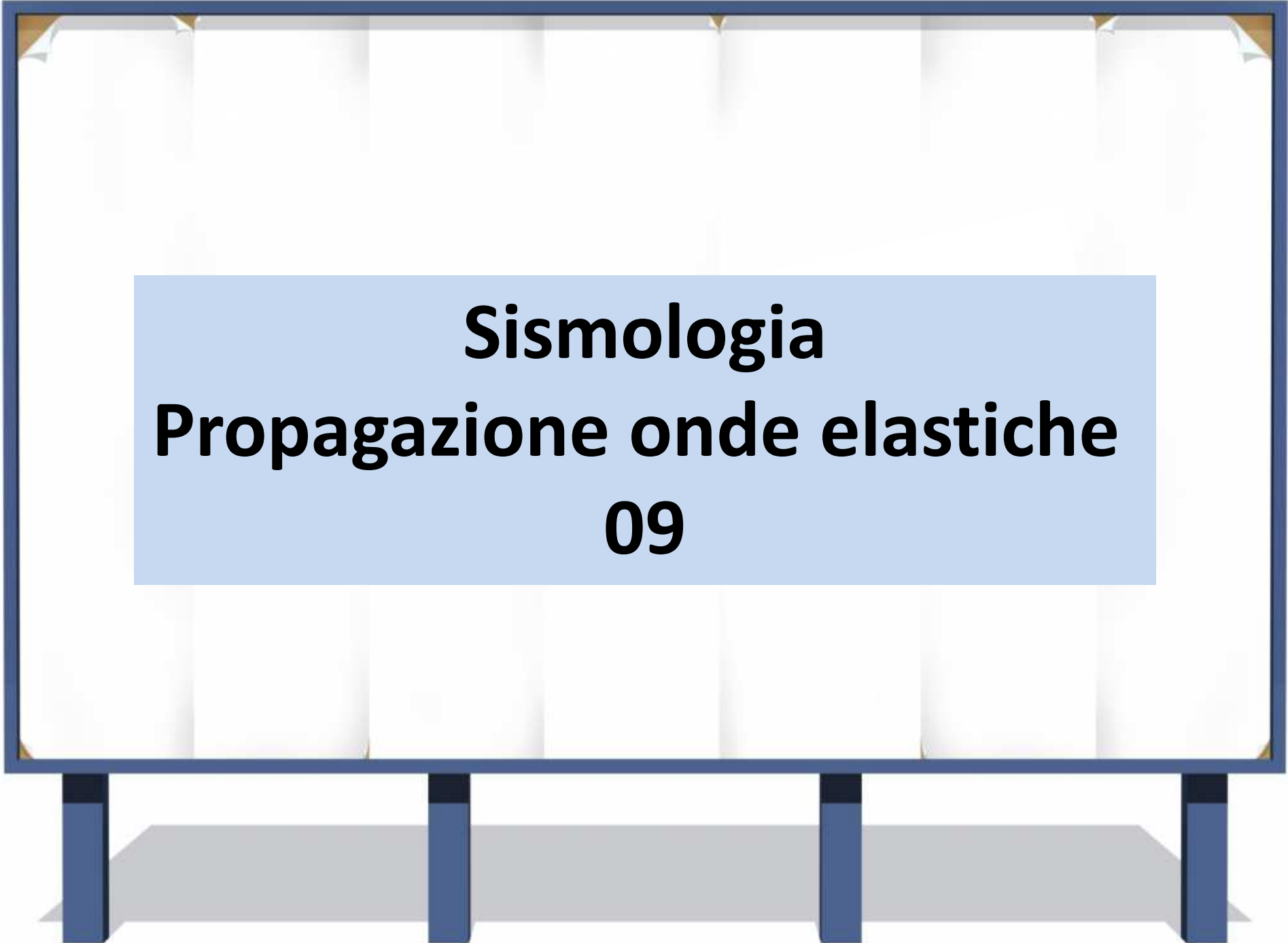


Sismologia e rischio sismico

concetti fisici – applicazioni - normativa

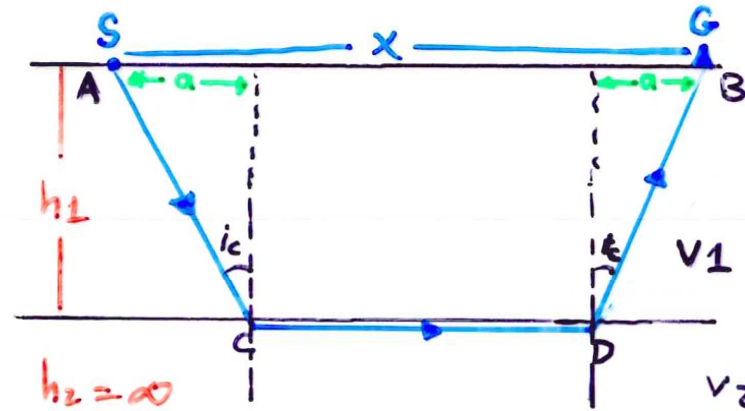


Sismologia

Propagazione onde elastiche

09

Analisi dati di sismica a rifrazione – modello a due strati



- Il tempo di arrivo dell'onda rifratta (T_r) è dato da

$$T_{AB} = \frac{AC}{V_1} + \frac{CD}{V_2} + \frac{DB}{V_1}$$

$$AC = DB = h_1 / \cos i_c$$

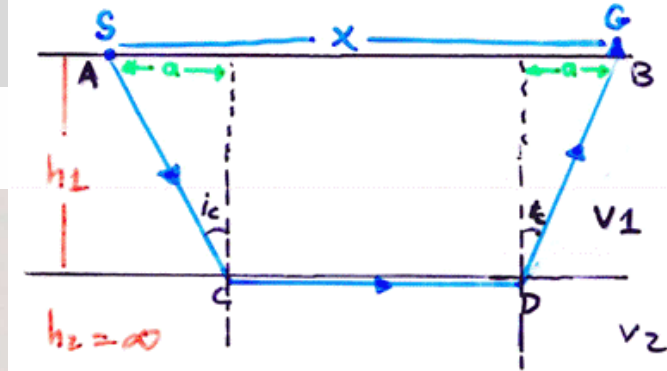
$$CD = x - 2a$$

$$\text{Con } \tan \theta_c = \frac{a}{h_1}$$

quindi si avrà

$$C.D = x - 2 \tan \alpha \text{ i.e. } h_1$$

Analisi dati di sismica a rifrazione



$$T_{AB} = \frac{2h_1}{v_1 \cos ic} + \frac{X - 2 \tan ic \cdot h_1}{v_2}$$

$$= \frac{X}{v_2} + \left(\frac{2h_1}{v_1 \cos ic} - \frac{2 \tan ic \cdot h_1}{v_2} \right)$$

$$= \frac{X}{v_2} + \left(\frac{2h_1}{v_1 \cos ic} - \frac{2h_1 \sin ic}{v_2 \cdot \cos ic} \right)$$

$$= \frac{X}{v_2} + \frac{2h_1}{\cos ic} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{\sin ic}{v_2} \right)$$

Dalla legge di snell
 $\sin ic = \frac{v_1}{v_2}$

$$= \frac{X}{v_2} + \frac{2h_1}{\cos ic} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{\sin ic \cdot \sin ic}{v_1} \right)$$

$$= \frac{X}{v_2} + \frac{2h_1}{\cos ic} \left(\frac{1 - \sin^2 ic}{v_1} \right)$$

$$= \frac{X}{v_2} + \frac{2h_1}{\cos ic} \left(\frac{\cos^2 ic}{v_1} \right)$$

$$T_{AB} = \frac{X}{v_2} + \frac{2h_1 \cos ic}{v_1}$$

Equazione (1) con la quale si può calcolare il tempo di arrivo delle onde bi-rifratte di un modello sintetico composto da 2 sismostrati

Analisi dati di sismica a rifrazione—calcolo profondità h_1 prima discontinuità

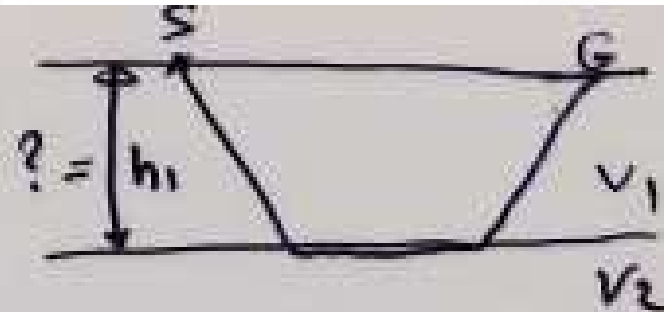
ti: il tempo intercetto:

È la proiezione della retta delle onde
bi-rifratte sull'ordinata ovvero
mettendo $x=0$ nell'espressione (1)

- Dal tempo di intercetto
si avrà

$$t_i = \frac{2 h_1 \cos i_c}{v_1}$$
$$= \frac{2 h_1 \sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2}$$

$$h_1 = \frac{t_i}{2} \cdot \frac{v_1 v_2}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}$$



a condizione che
 $v_2 > v_1$

Analisi dati di sismica a rifrazione—calcolo profondità h_1 prima discontinuità

Utilizzando il punto ginocchio:

Definisce il punto di arrivo di due tipi di onde:

(1) Onda diretta (T_d) e (2) onda bi-rifratta (T_r)

a condizione che
 $V_2 > V_1$

si avrà

$$T_d = T_r$$

$$T_d = \frac{X}{V_1}$$

$$T_r = \frac{X}{V_2} + \frac{2h_1 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

mettendo $T_d = T_r$ si otterrà

$$h_1 = \frac{X}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

T_d : tempo di percorso dell'onda diretta

T_r : tempo di percorso dell'onda rifratta

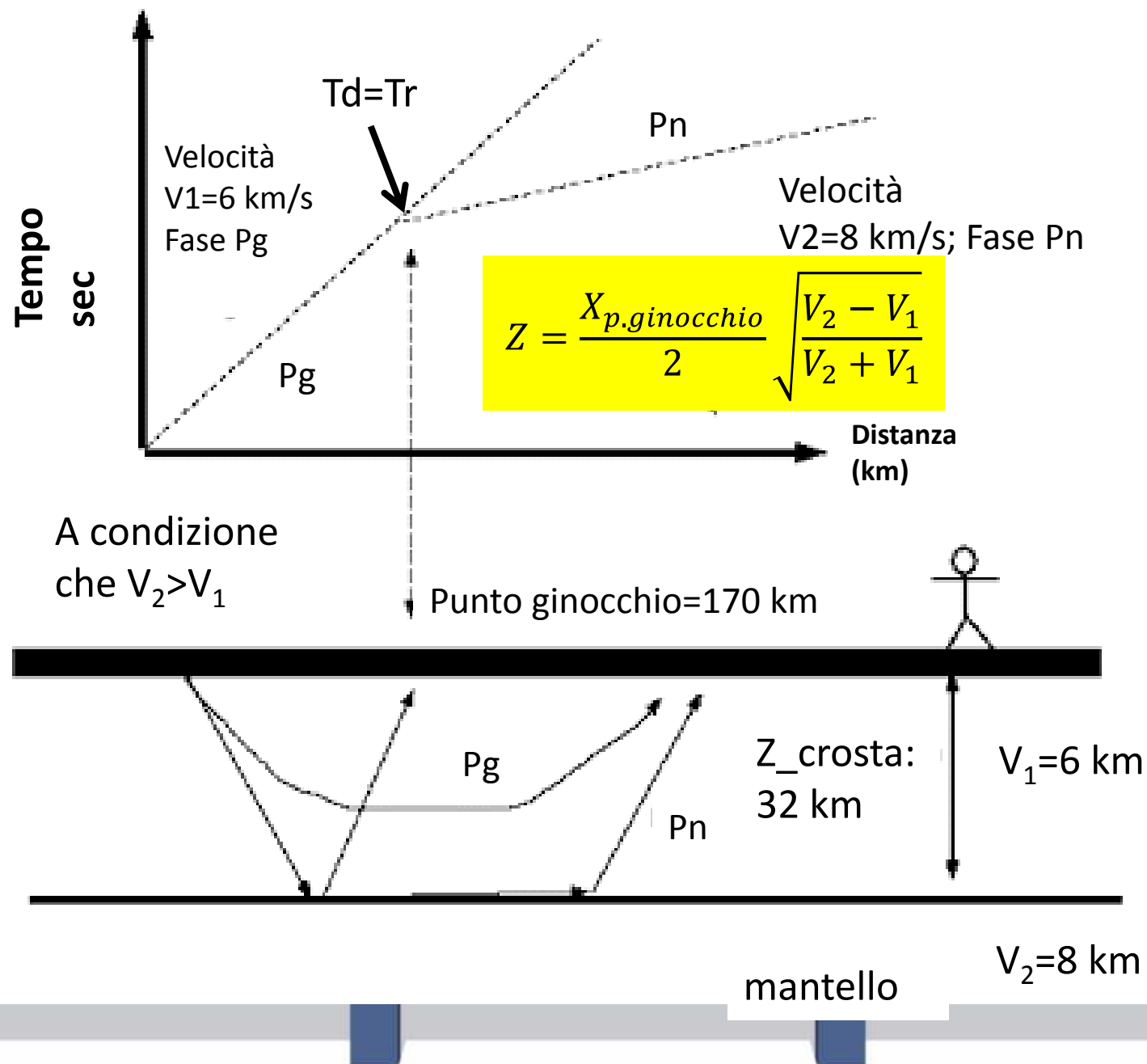
V_1, V_2 in metri / secondo

h_1 in metri

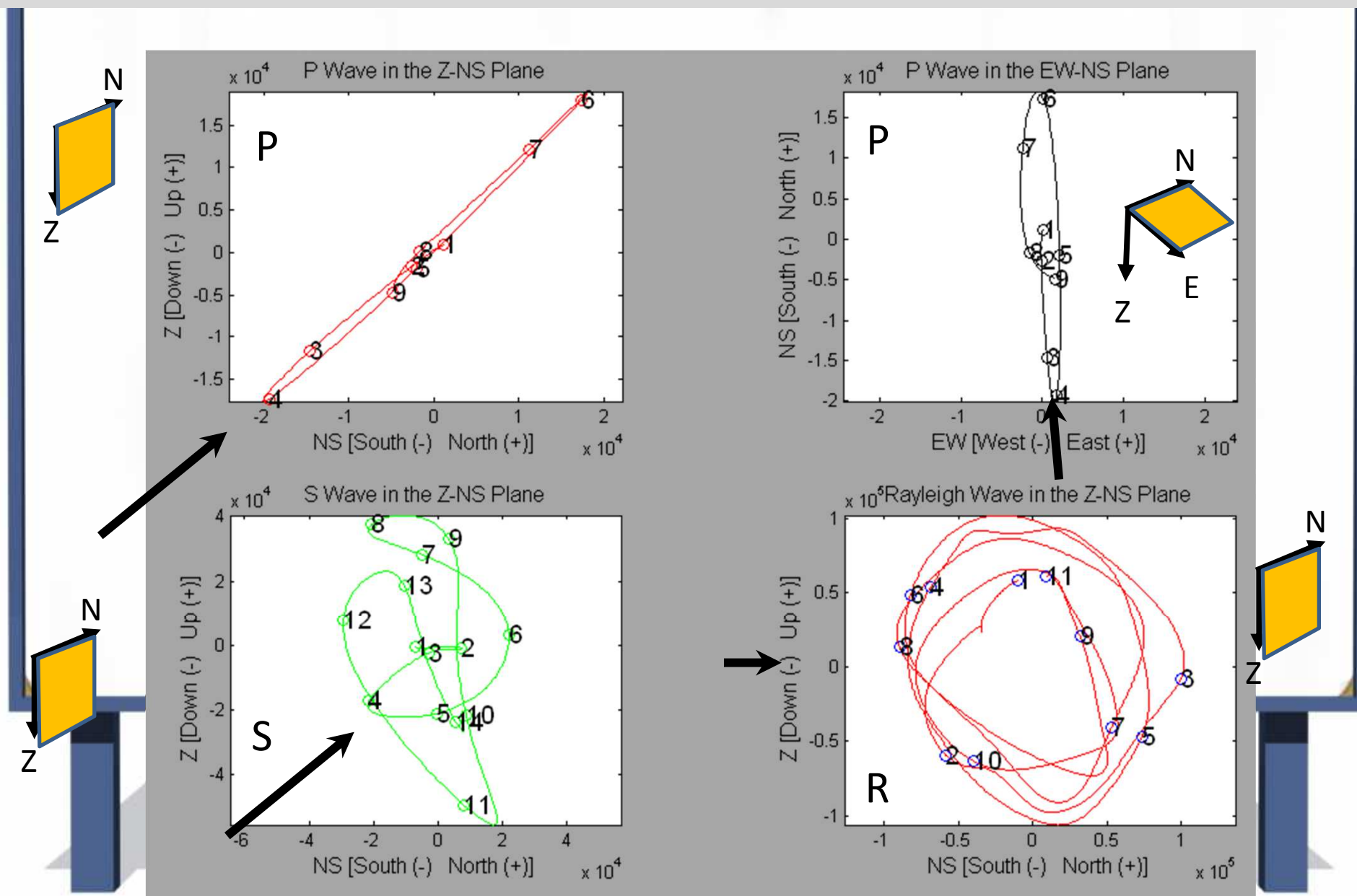
X in metri

"punto ginocchio"

Modello sismico della crosta: calcolo profondità **z** della Moho



Movimento delle particelle di uno treno di onde che è stato registrato da un sismometro:
Le frecce mostrano la direzione approssimativa di propagazione dell'onda (percorso raggio sismico); i numeri indicano l'istante di arrivo della fase sismica (energia coerente)

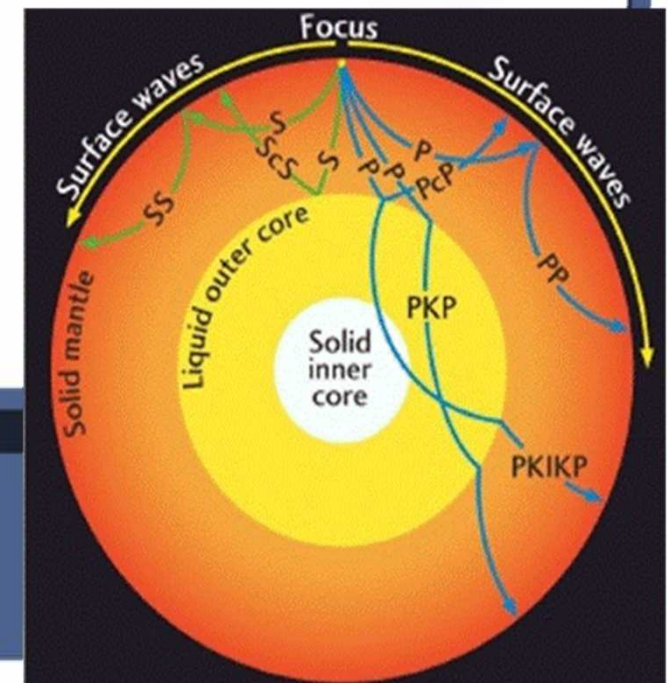


Nomenclatura onda sismiche prodotte da terremoti

- **Crosta**
- **Mantello**
- **nucleo**

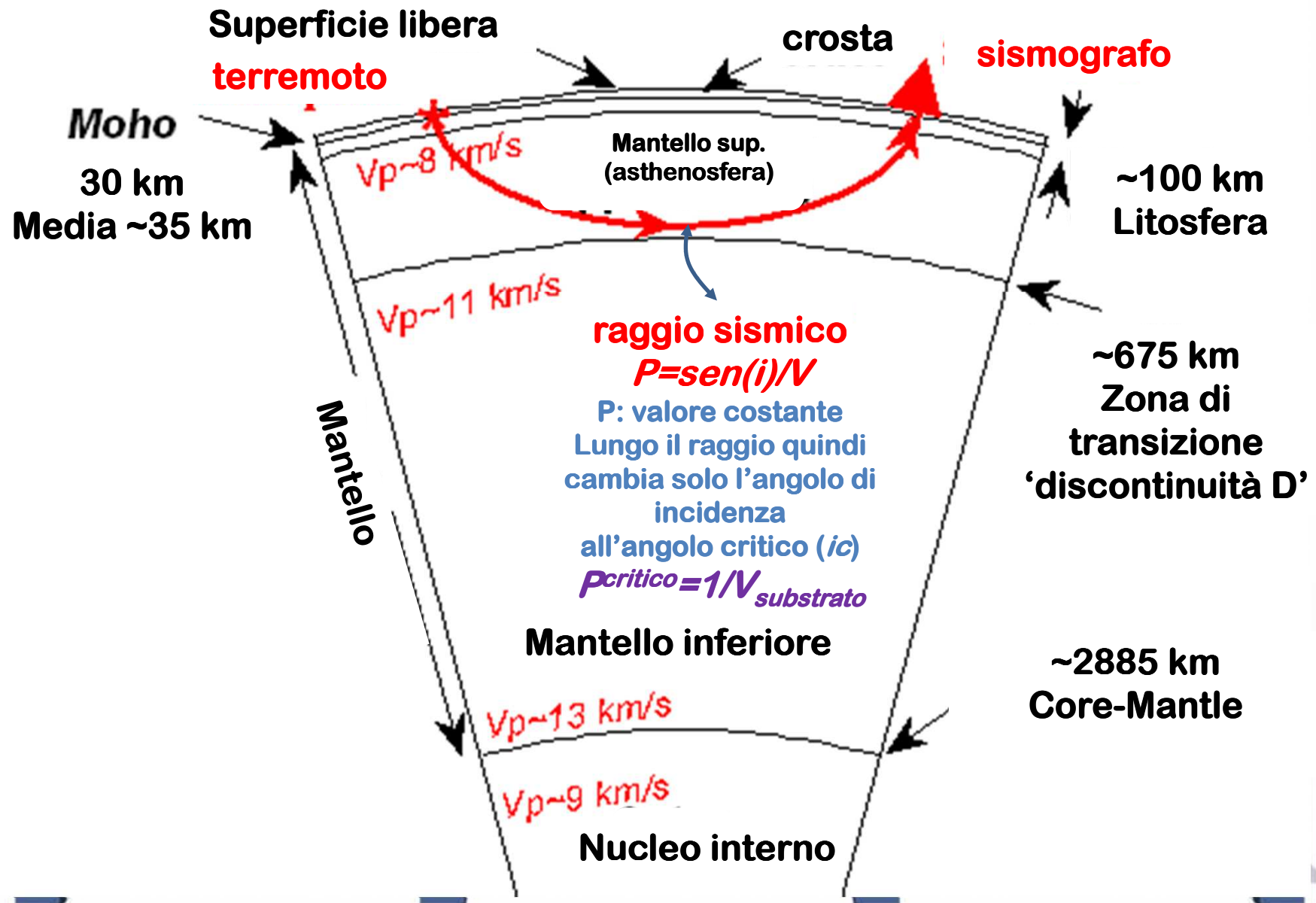
Eterogeneità a scala globale-Discontinuità-scoperte grazie all'analisi di onde sismiche (o elastiche) generate da terremoti

Discontinuities	Depth (km)	Composition
Lehman	5144	Fe solid against FeO, FeS fluid (inner/outer core boundary)
Gutenberg	2885	fluid FeO, FeS against (Mg, Fe) silicates, velocity decrease, density increase (outer core-mantle boundary)
D''	2870	thin, mixing of mantle and core material? (D''=D double-prime)
670 km	670	worldwide, no earthquakes deeper, debates over whether a composition, phase, or viscosity change worldwide
400 km	400	worldwide
LVZ	50-200	regionally variable depth
Moho	4-55	(abbreviation of Mo-ho-RHO-vi-chik) - sharp compositional change mafic to felsic crust, often absent
Conrad	? 5-30	In Europa: 8-10 km

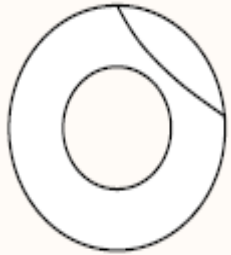


Terra – propazione onde dirette P ed S

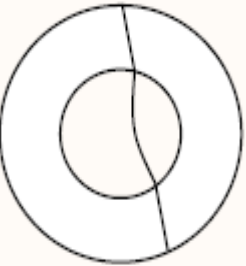
Distanza epicentrale $\sim 18^\circ$ ($360^\circ = 2 \cdot \pi \cdot R = 6378 \text{ km}$)



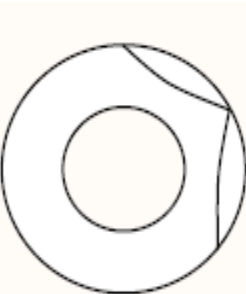
Fasi sismiche - nomenclatura fasi sismiche



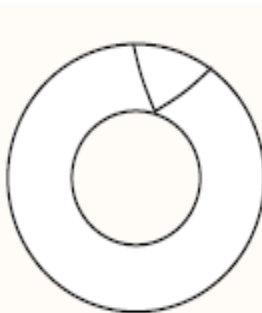
❶: P ed S dirette



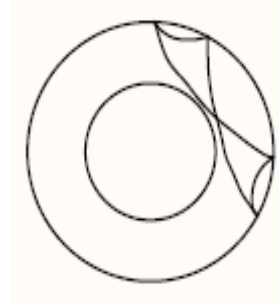
❷: **PKP** dirette che hanno attraversato il nucleo



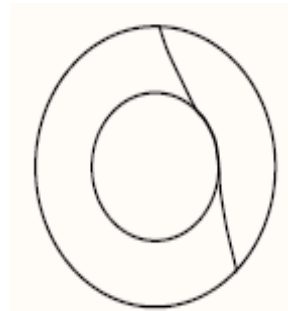
❸: **pP** ed **sS**, partono dal fuoco verso la superficie libera poi vengono riflesse prima di raggiungere la stazione



❹: **PcP** ed **ScS** riflesse dalla superficie del nucleo



❺: **PS** ed **SP** onde convertite



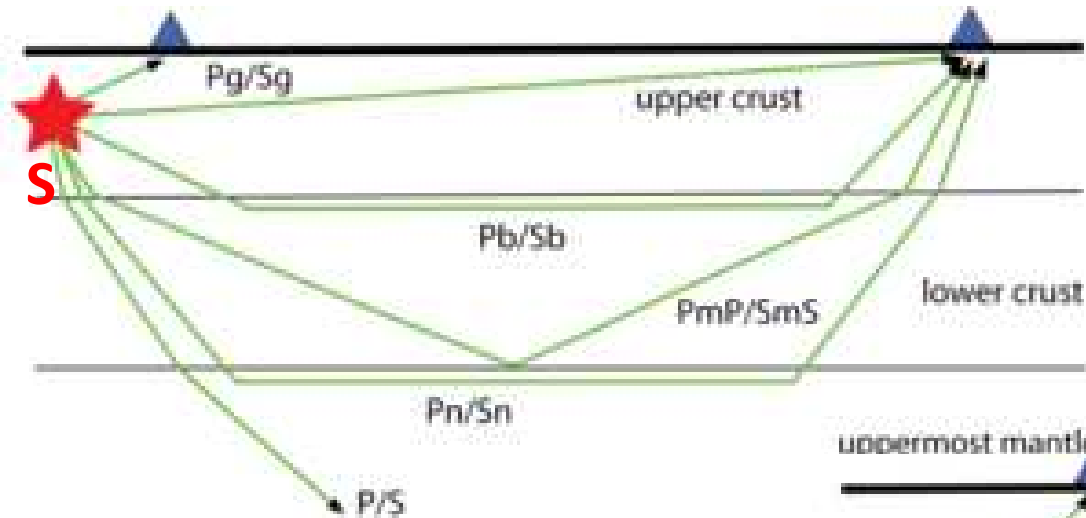
❻: **P** ed **S** diffratte

Nomenclatura onda sismiche prodotte da terremoti

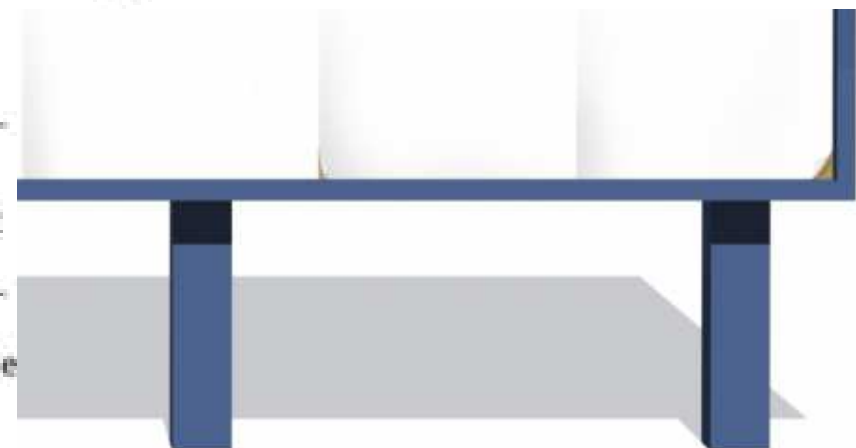
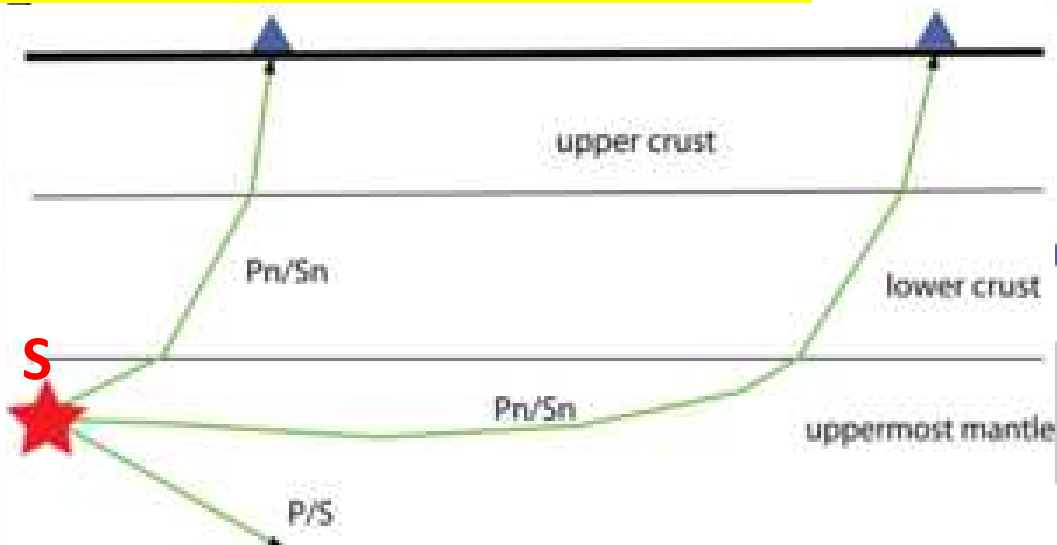
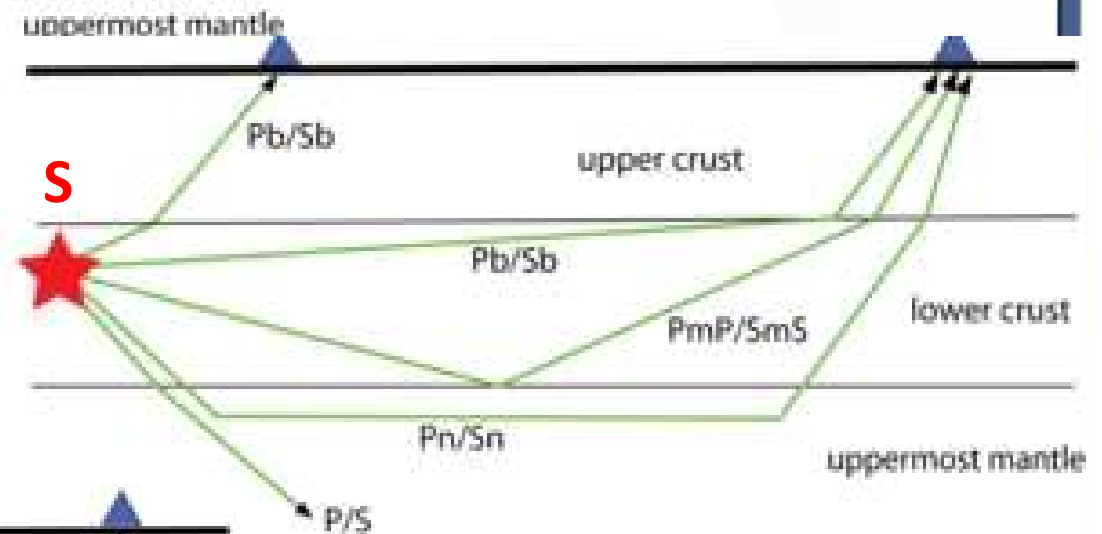
P	onde P
S	onde S
piccola <i>p</i>	fasi di profondità (P)
piccola <i>s</i>	fasi di profondità (S)
c	riflessa dalla CMB
K	onde nel nucleo esterno
I	onde nucleo interno
i	Riflessa dalla superficie del nucleo interno
diff o <i>pd</i>	diffratte dalla superficie CMB

esempi: PcP, pPcS, SKS, PKKKP, PKiKP, PKIKP, sSS, pSSS, sPcS, etc.

Fasi sismiche - nomenclatura fasi sismiche nella crosta



g: crosta superiore
b: superficie crosta inferiore (P*,S*)
m: superficie della Moho
n: mantello superiore
p/s: onde convertite
S: sorgente



Terremoto: onde elastiche – crosta continentale semplificata

F: ipocentro

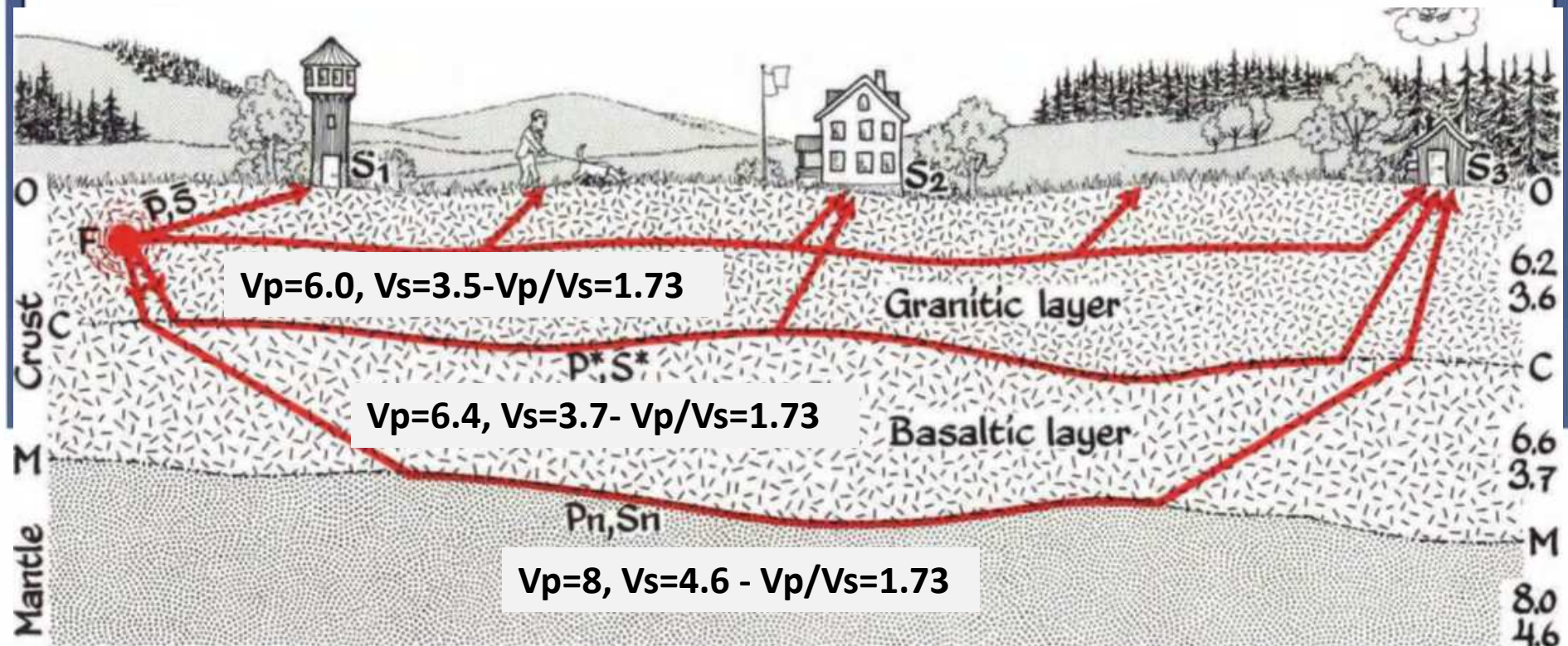
S₁: stazione di monitoraggio sismico

P: onda diretta

S: onda diretta

P*, **S***: rifratte dalla superficie di **Conrad**

P_n, **S_n**: rifratte dalla discontinuità della **Moho**



Terremoto: onde elastiche – crosta continentale semplificata

F: ipocentro a **profondità maggiore**

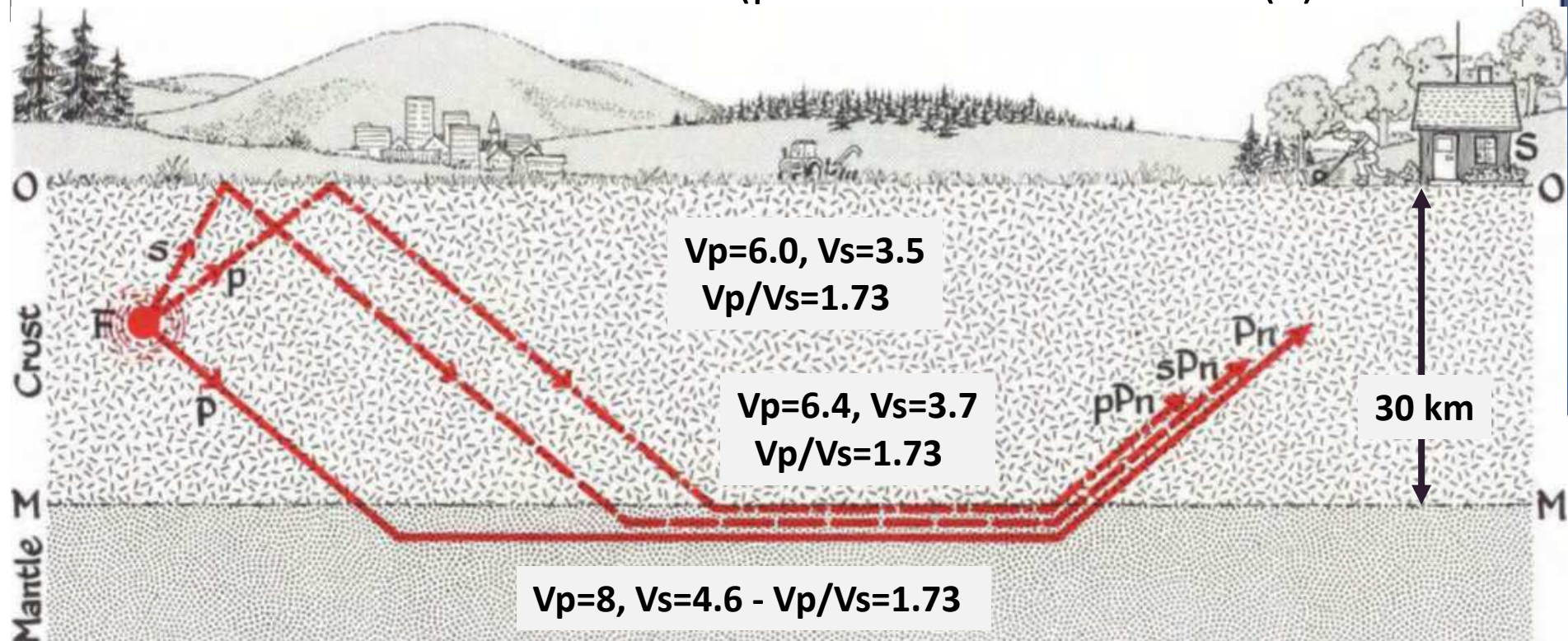
S: stazione di monitoraggio sismico lontana

P: onda diretta (arrivano dopo)

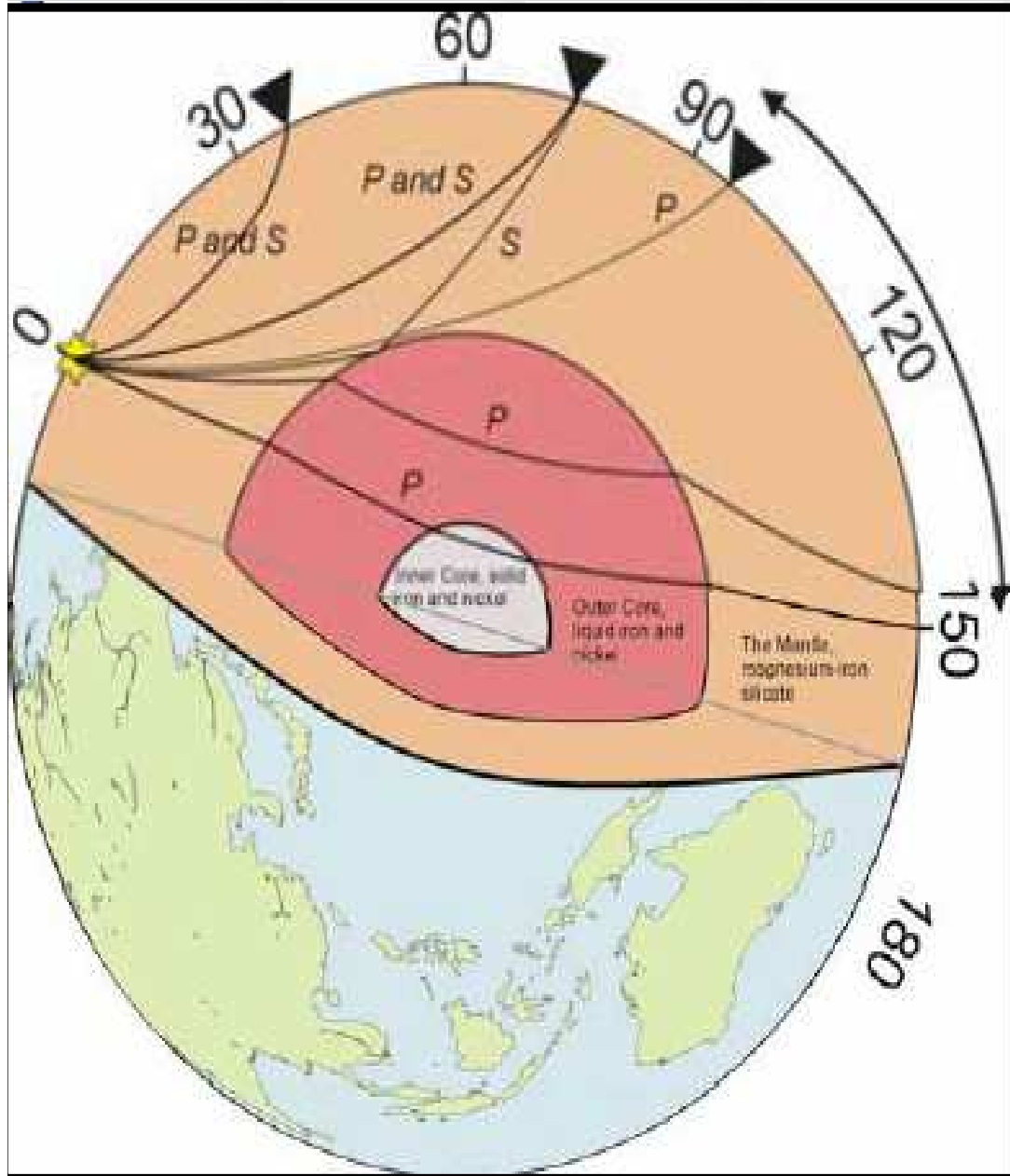
S: onda diretta (arrivano dopo)

P*, **S***: rifratte dalla superficie di Conrad (?)

Pn, **Sn**: riflesse dalla superficie libera, convertite e rifratte dalla discontinuità della Moho (primi arrivi alle stazioni (**S**) lontane)



Onda diretta "P": zona d'ombra [104°-143°]

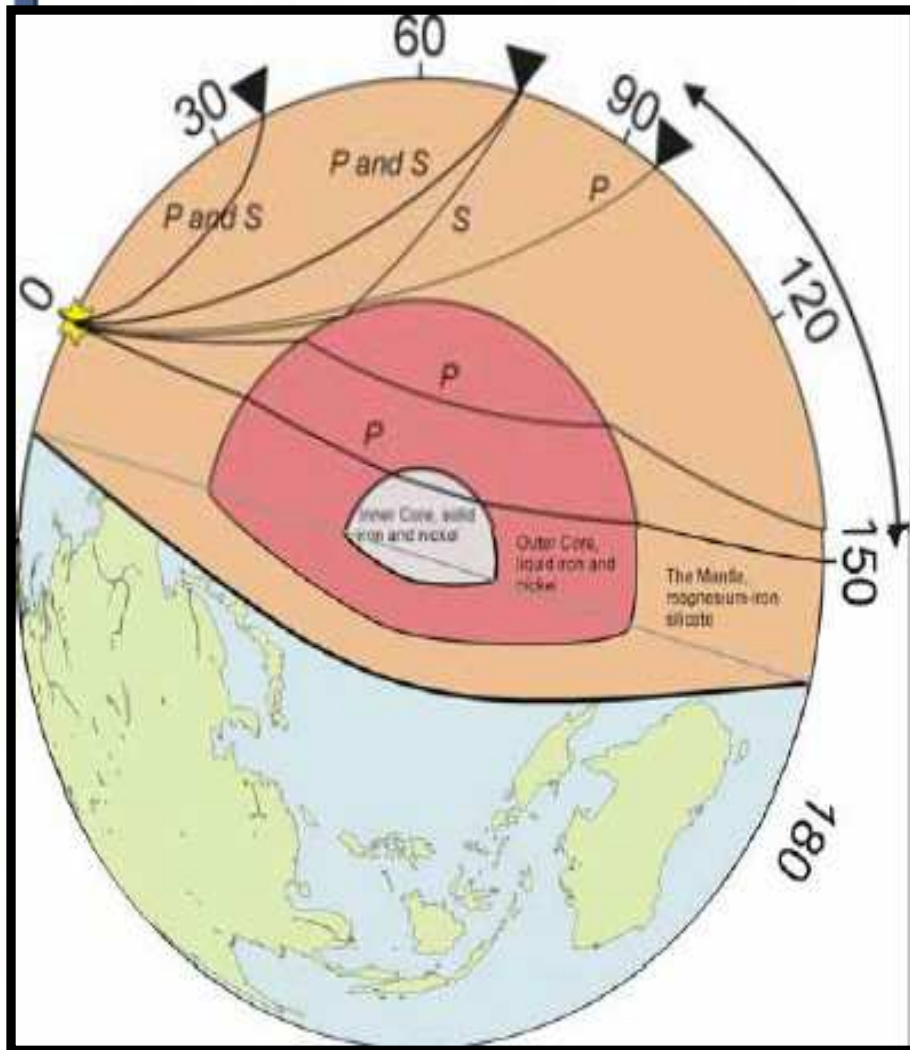


L'arrivo coerente di onde sismiche alla stazione sismologica definisce una fase sismica.

Le onde sismiche attraversano la terra ed ad ogni discontinuità subiscono riflessioni, rifrazioni e diffrazioni.

La registrazione delle onde sismiche dipende dalla distanza stazione-epicentro per cui a causa dello stato ,liquido, del nucleo esterno, le onde P dirette non raggiungono stazioni localizzate ad una distanza compresa tra 104°-143°. Questa zona si chiama «zona d'ombra o shadow zone»

Onda diretta "S": zona d'ombra [$>103^\circ$]



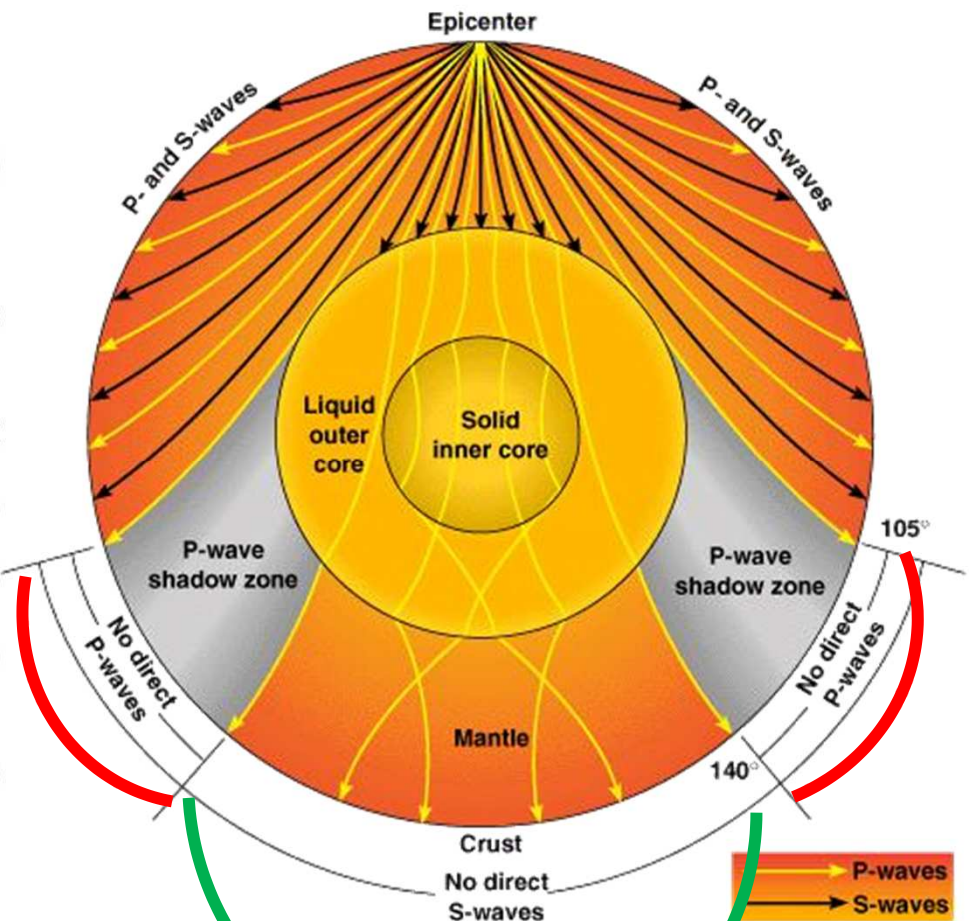
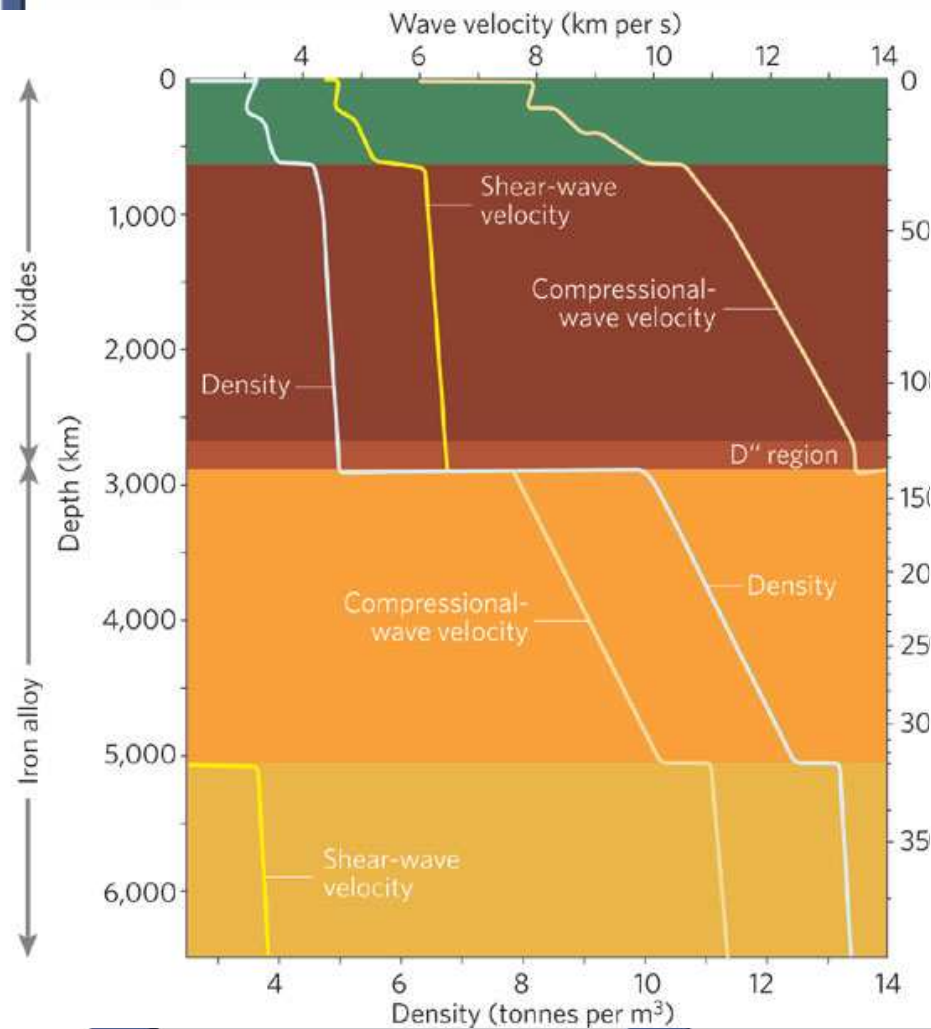
L'arrivo coerente di onde sismiche alla stazione sismologica definisce una fase sismica.

Le onde sismiche attraversano la terra ed ad ogni discontinuità subiscono riflessioni, rifrazioni e diffrazioni.

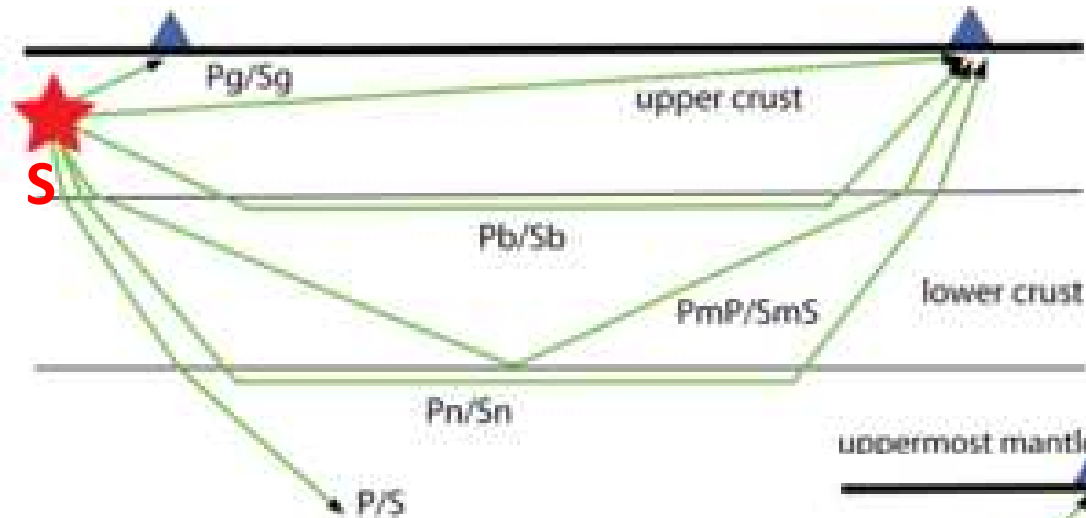
La registrazione delle onde sismiche dipende dalla distanza stazione-epicentro per cui a causa dello stato ,liquido del nucleo esterno, **le onde S non si propagano per cui oltre la distanza (103°) tra stazione sismologica ed epicentro nessun arrivo diretto di onde S viene registrato** ciò definisce «zona d'ombra o *shadow zone onde S*»

Zone d'ombra (shadow zones) - riassunto

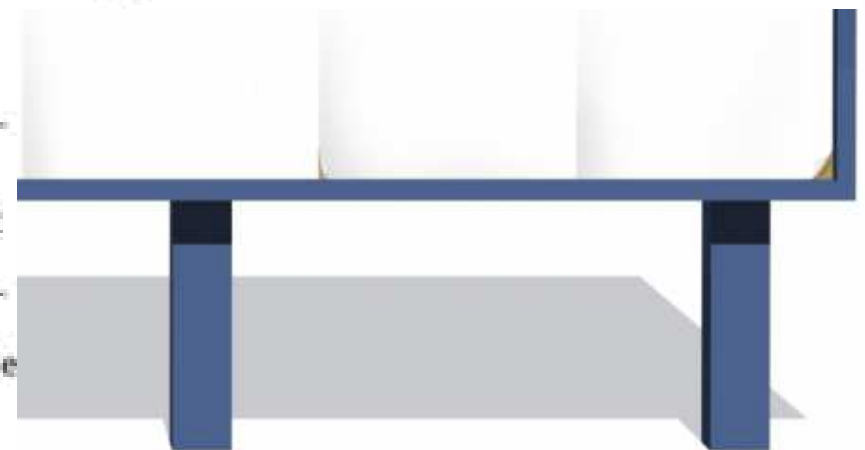
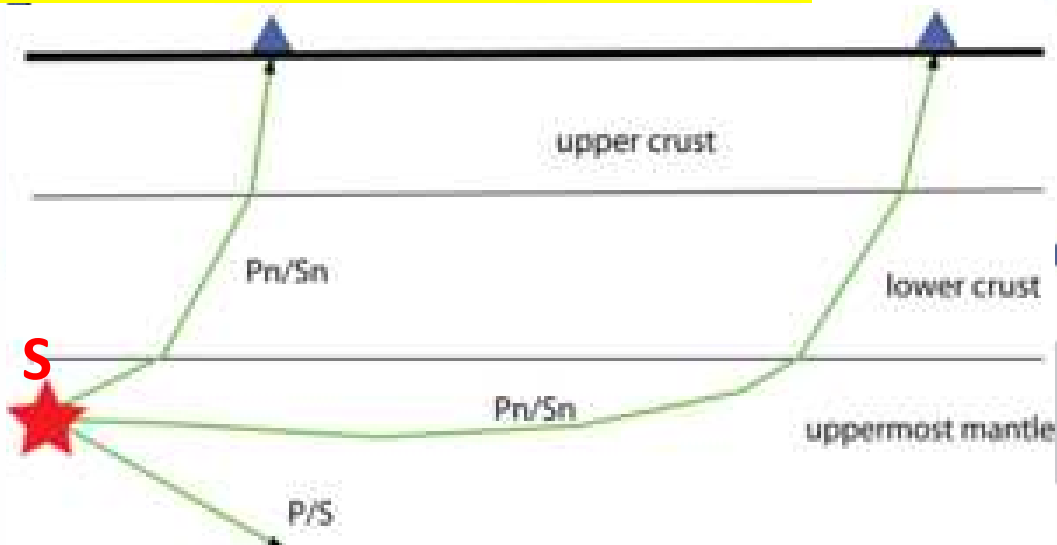
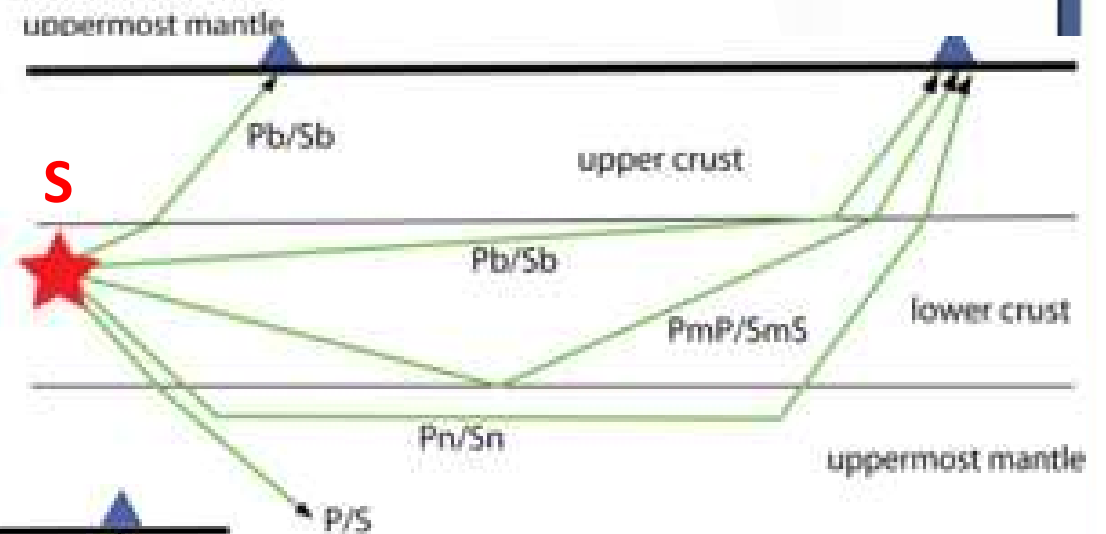
Video mp4 IRIS
A_006_shadowzone4_swave.mp4



Fasi sismiche - nomenclatura fasi sismiche nella crosta



g: crosta superiore
b: superficie crosta inferiore (P^* , S^*)
m: superficie della Moho
n: mantello superiore
p/s: onde convertite
S: sorgente



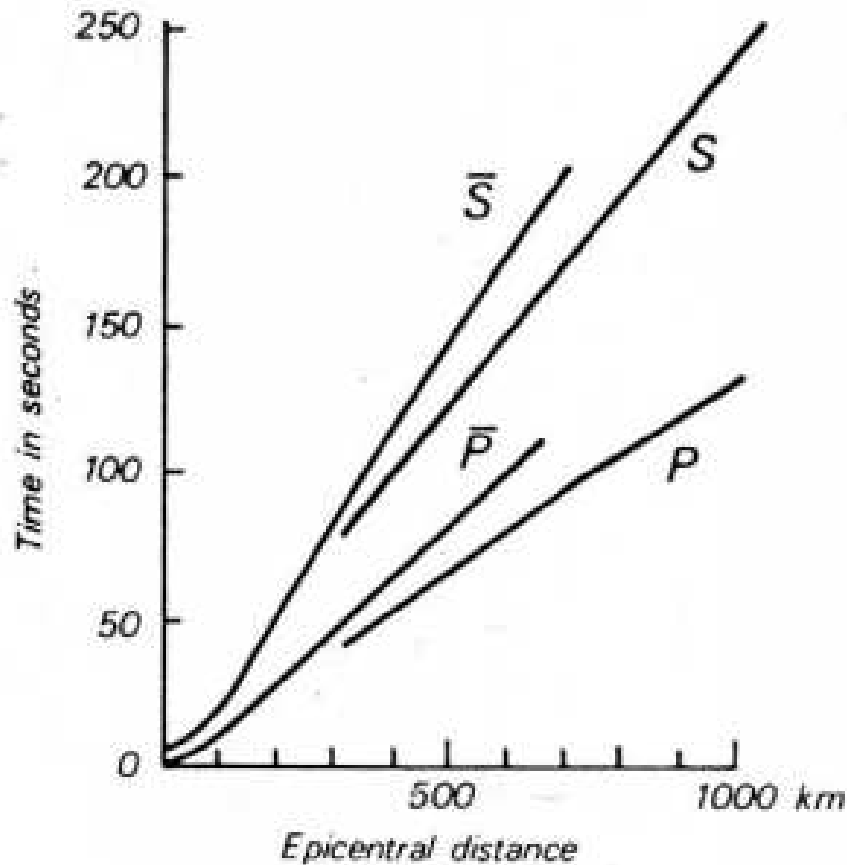
La Moho: i calcoli di Mohorovicic – ha misurato i tempi di arrivo dei primi arrivi delle onde P ed S presso stazioni sismologiche poste a diverse distanze epicentro-stazione.

$$P = P_n$$

$$S = S_n$$

$$\bar{P} = P_g$$

$$\bar{S} = S_g$$



Andrija Mohorovicic

Zona: balcani

Lettura tempi d'arrivo della prima fase sismica (P),

Costruzione grafico T-X

Osservazione:

Due rette: **P e P** (altre fasi di tipo P)

Necessitano un modello di velocità a due strati con **$V_2 > V_1$**

Questa superficie l'ha chiamato

La discontinuità Mohorovicic (**Moho**)

Modello sismico della crosta: calcolo profondità **z** della Moho

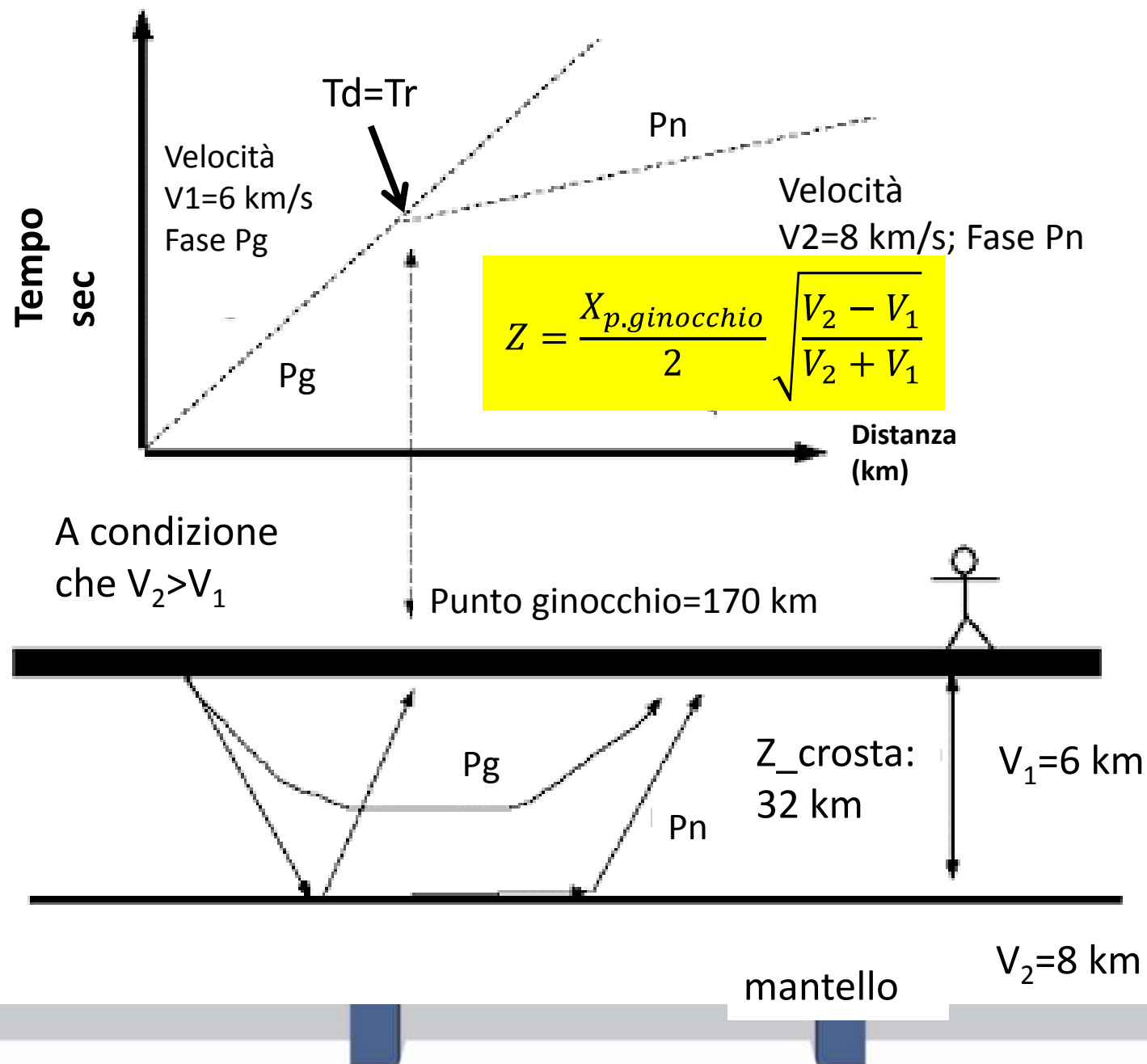
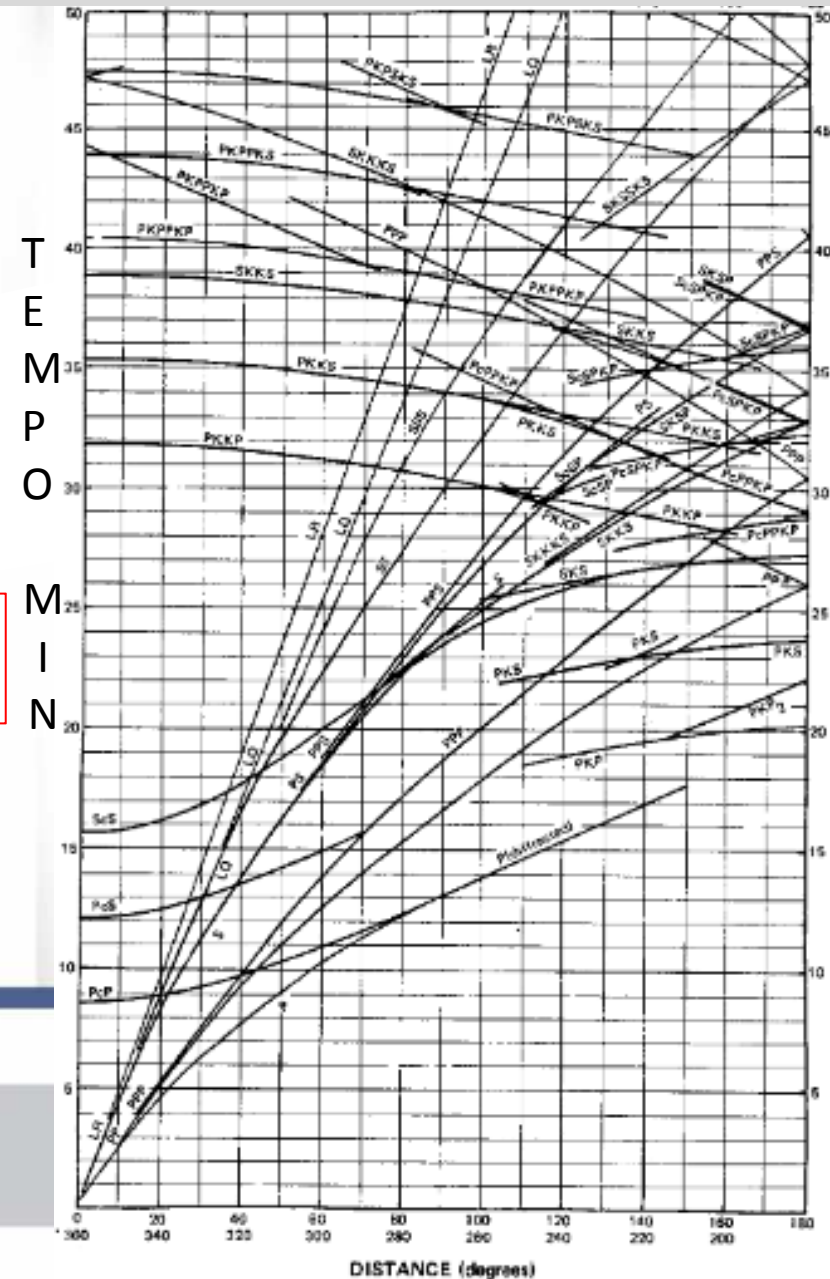
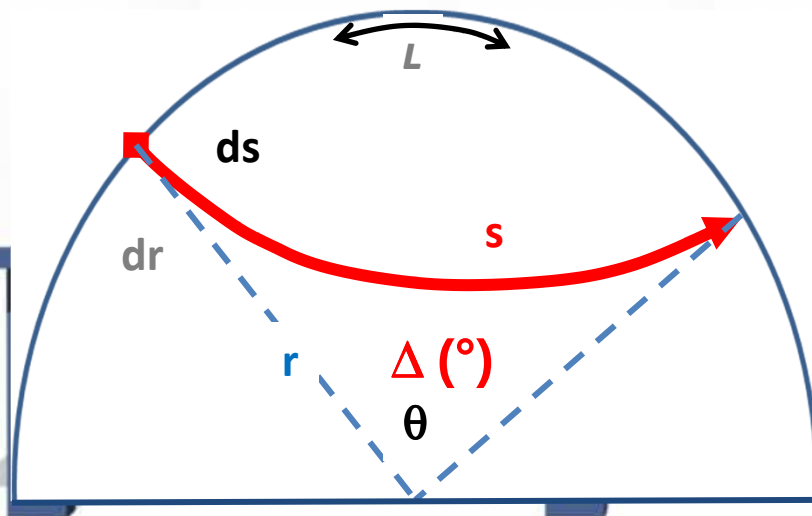


Grafico Tempo-distanza delle diversi fasi sismiche. secondo Jeffreys-Bullen

La figura sotto rappresenta una sezione Verticale lungo un raggio sismico s (ray parameter « P »). La distanza epicentrale si misura in gradi (grafico sotto)

Essa rappresenta l'angolo che si forma dalla Proiezione di due raggi (sorgente e stazione) verso il Centro della terra. Il raggio medio della Terra (=6371 km)

$$L = \frac{angolo}{360^\circ} * (2\pi r) \quad 1^\circ latitudine = 111.19 \text{ km}$$

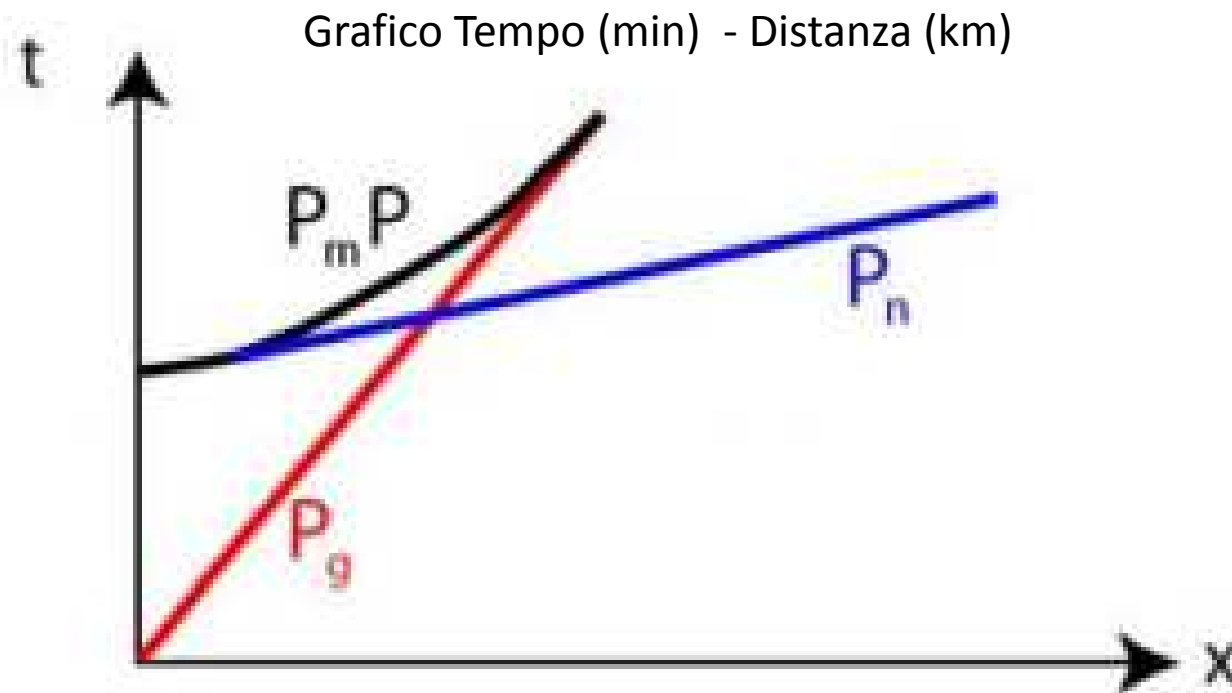


Dromocrone di tre diversi fase sismiche ?

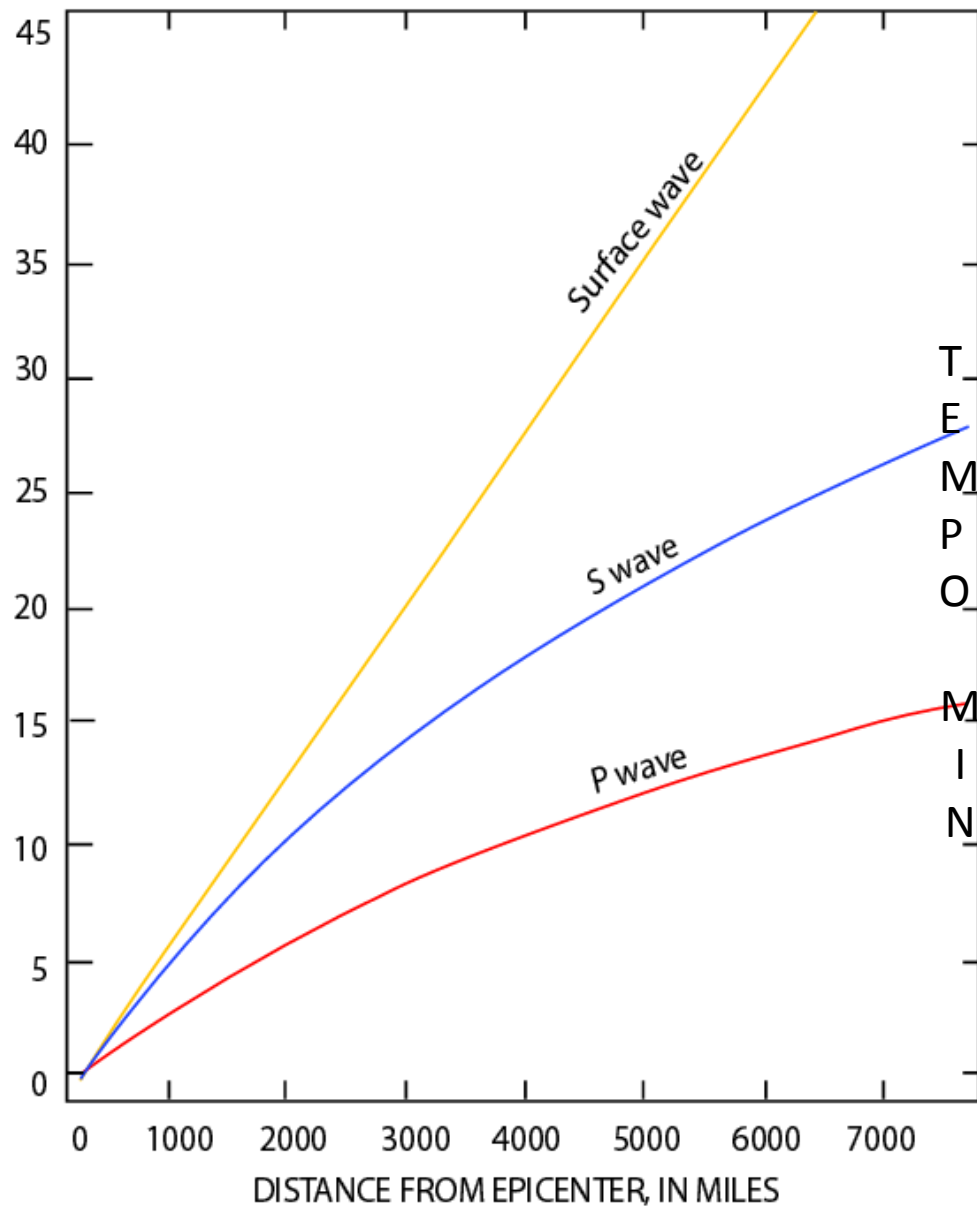
Pg: onda diretta

Pn: rifratte dalla discontinuità della **Moho**

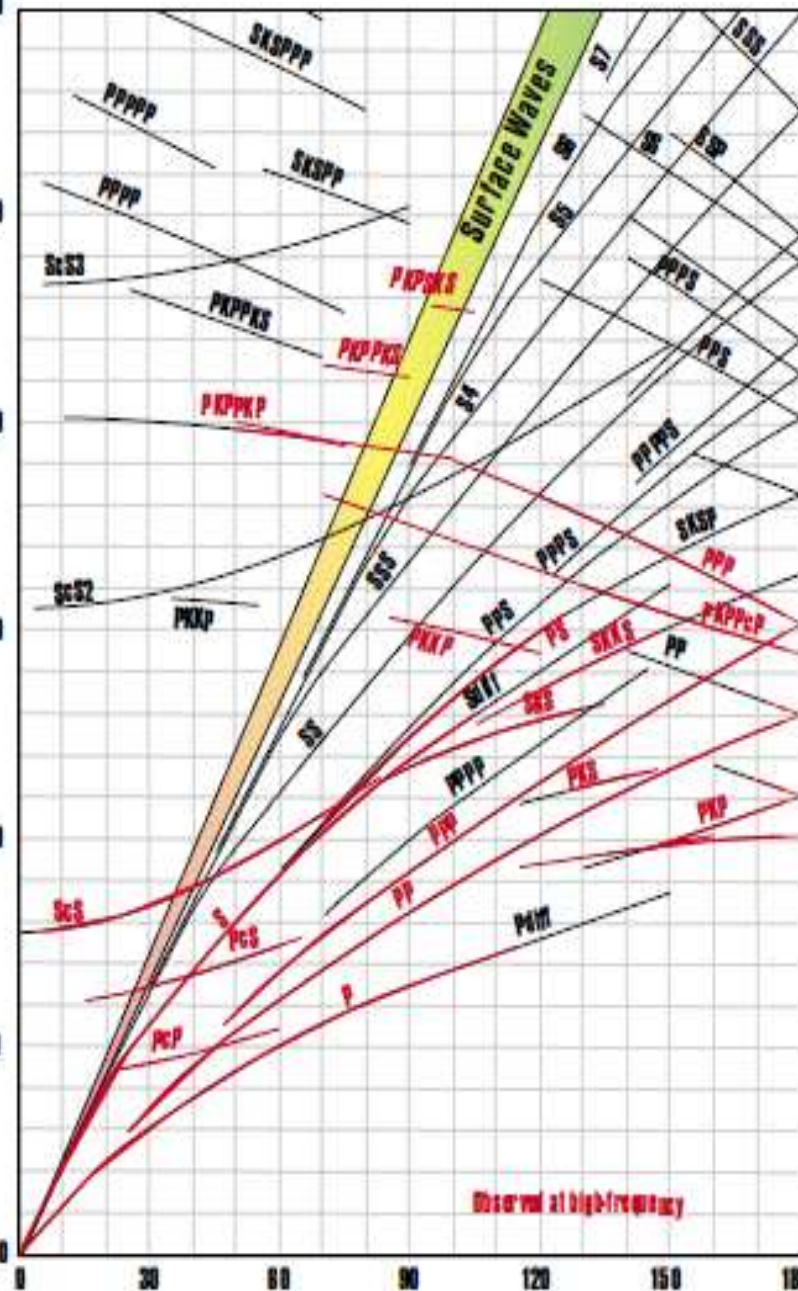
PmP: riflessa dalla discontinuità mantello-nucleo esterno



TIME AFTER START OF EARTHQUAKE, IN MINUTES



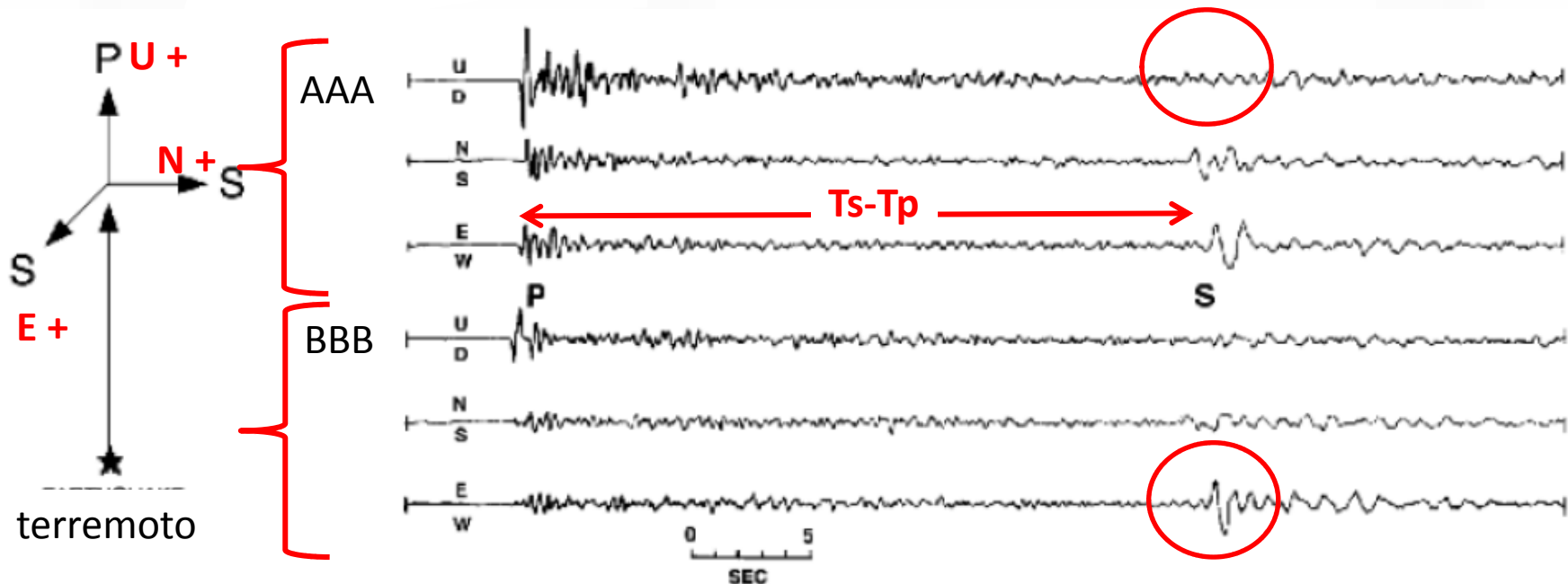
TEMPORAL



Distanza "gradi"

Polarità fase sismica P

I sismometri (E.M.) sono disegnati per registrare la velocità di vibrazioni delle particelle nelle direzioni verticali ed orizzontali,
I tempi di arrivo sono precisi grazie alla sincronizzazione con i segnali del tempo forniti dai satelliti '**GPS**'. Questo permette il confronto delle registrazioni di diverse stazioni,
Convenzionalmente la polarità della prima fase, dovuta all'onda **P**, viene descritta come 'positiva U «UP»' o 'negativa D «DOWN»'



Stazioni remote per il monitoraggio sismico A-E

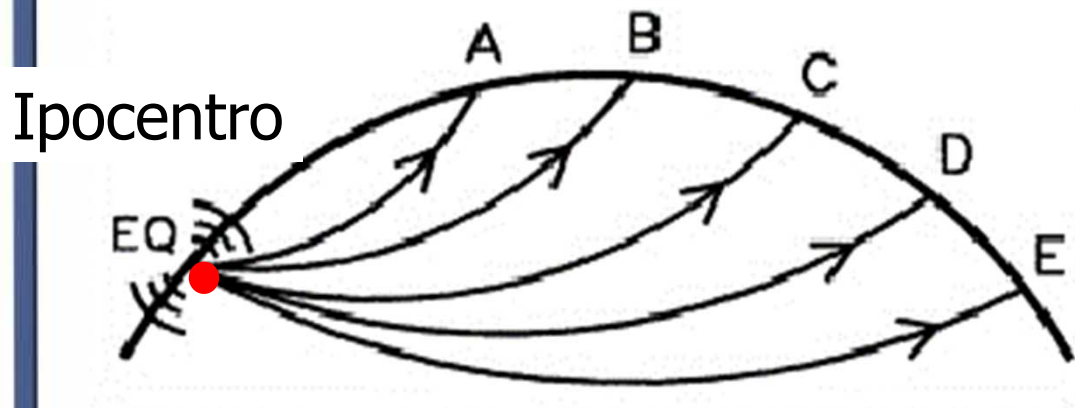
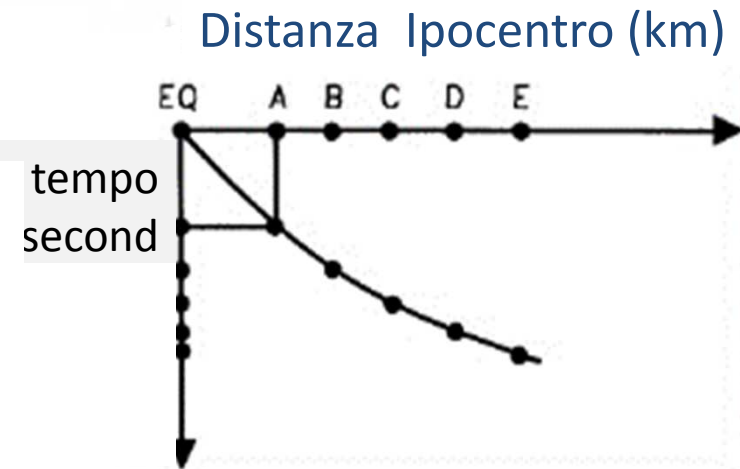


Grafico T-X



Le stazioni sismologiche misurano il tempo d'arrivo delle diversi fasi sismiche (P, S: riflesse-rifratte dalle discontinuità principale della terra; inoltre misurano anche il tempo d'arrivo delle onde superficiali: R ed L). **In particolare condizioni misurano anche onde denominate «T»:** sono le onde che attraversano i mezzi marini (bassa densità e velocità) ed arrivano in ritardo alle stazioni più vicine di solito dislocate lungo le coste

I parametri dinamici relativi al fuoco sono:

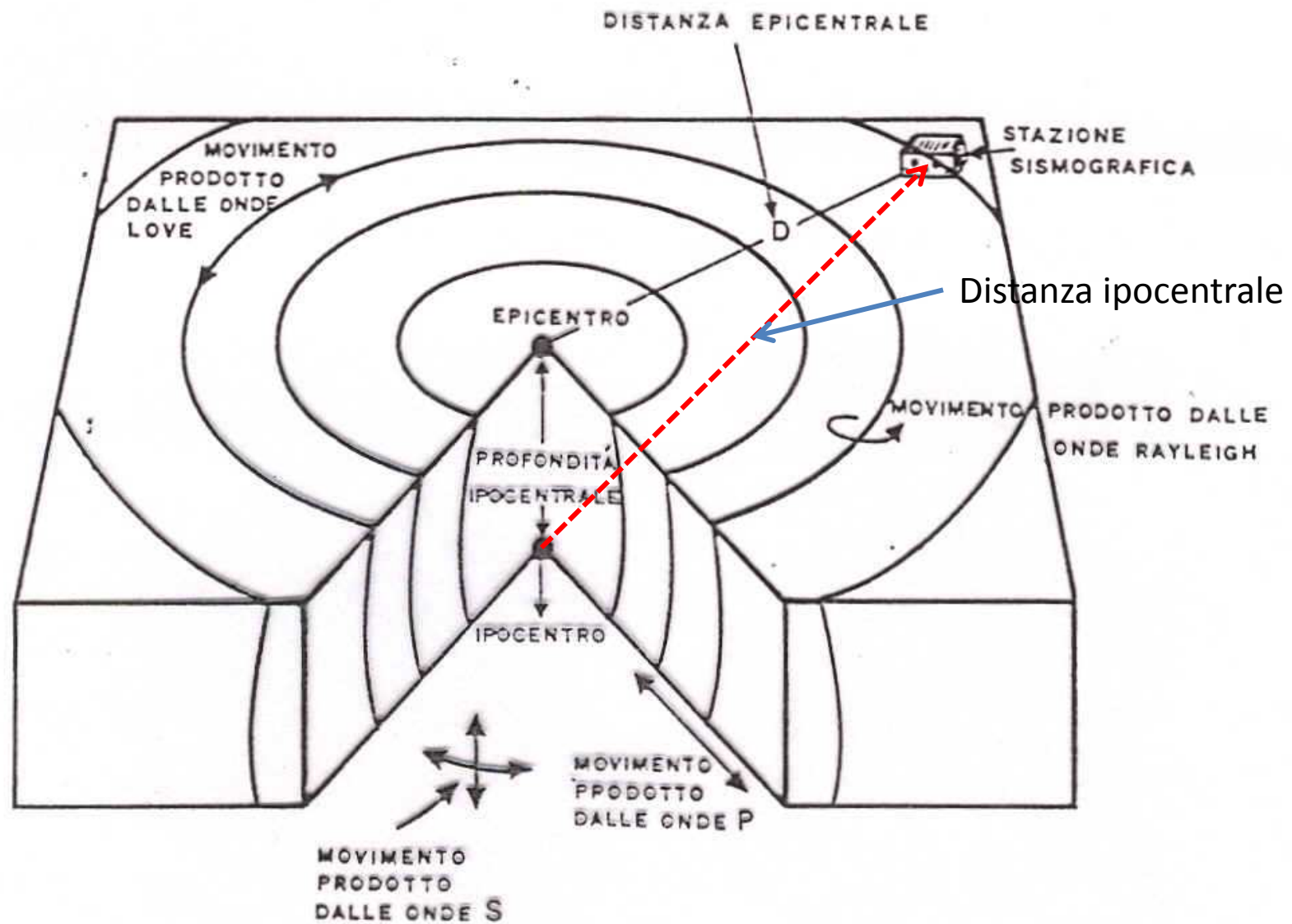
- Magnitudo,
- energia irradiata sotto forma di onde sismiche,
- momento sismico

Sismologia
Propagazione onde elastiche
Fine parte 09

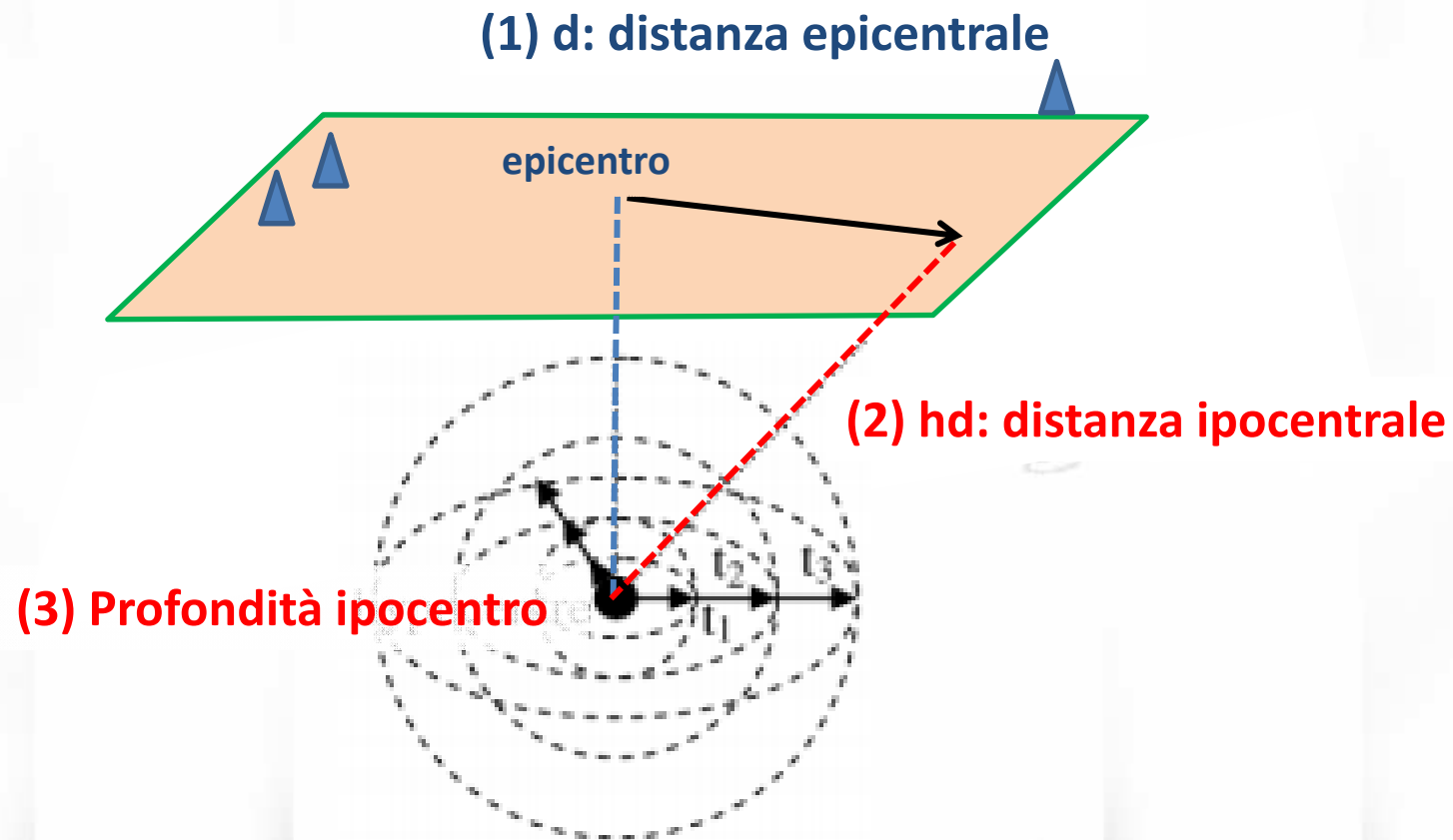
Parametri cinematici dei terremoti

- coordinate dell'**epicentro** (la distanza tra la proiezione dell'ipocentro sulla superficie libera e la stazione di rilevamento dell'evento tellurico)
- Coordinate **dell'ipocentro o fuoco**
il volume nel quale avviene la prima della rottura ed il susseguente rilascio di energia
- **Tempo origine (T_0)** dell'istante della rottura lungo una superficie di faglia e l'inizio dell'irradiazione di onde elastiche

Terremoti – onde elastiche



Parametri cinematici dei terremoti: sorgente puntiforme



L'energia elastica si irradia dal fuoco in forma sferica

Nelle prossime diapositive:

- (1) Differenza temporale tempo d'arrivo onde P ed s
- (2) Calcolo tempo di origine con la tecnica Wadati
- (3) Determinazione rapporto V_p/V_s
- (4) Calcolo distanza epicentrale (metodo grafico)
- (5) Calcolo profondità ipocentro
- (6) Scale di magnitudo ed intensità