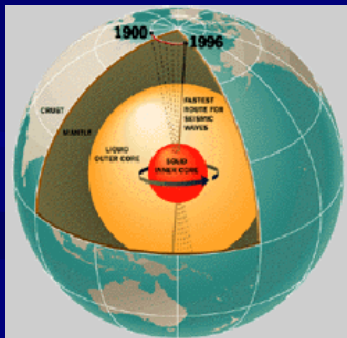


Δομή και Σύσταση του Εσωτερικού της Γης



Μάθημα: Φυσική της Λιθόσφαιρας
Κεφάλαιο 2

Αναστασία Α Κυρατζή
Τομέας Γεωφυσικής

Μάθημα 1^ο

- Εισαγωγή
- Ορισμοί
- Ελαστικά κύματα
- Ταχύτητες – ιδιότητες ελαστικών κυμάτων
- Συμβολισμοί ακτινών στο εσωτερικό της Γης

Αντικείμενο

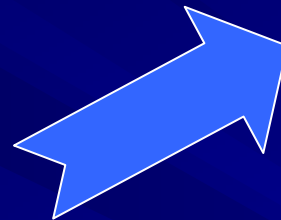
- **Δομή του εσωτερικού της Γης:** εννοούμε την κατά κύριο λόγο κατακόρυφη κατανομή στο εσωτερικό της φυσικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν το υλικό της, όπως
 - Η πυκνότητα
 - Οι ελαστικές σταθερές
- **Σύσταση του εσωτερικού της Γης:** εννοούμε την ορυκτολογική σύσταση του υλικού της
 - Χημική σύσταση
 - Κρυσταλλική δομή

Συμβολή της Σεισμολογίας

- Ο καθορισμός της πυκνότητας και των ελαστικών σταθερών γίνεται με βάση τον καθορισμό της κατακόρυφης κατανομής των ταχυτήτων των ελαστικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης.
- Αυτή η κατανομή δίνει και τα βασικά στοιχεία για την ορυκτολογική, τη χημική και τη θερμική κατάσταση του εσωτερικού της Γης.

Ελαστικές σταθερές και ταχύτητες ελαστικών κυμάτων χώρου

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα V_p των επιμήκων κυμάτων P και η ταχύτητα V_s των εγκάρσιων κυμάτων S δίδεται και από τις σχέσεις



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

K = μέτρο κυβικής ελαστικότητας (πως αντιδρά το υλικό σε μεταβολές της πίεσης)



μ = συντελεστής δυσκαμψίας (πως αντιδρά το υλικό σε διατμητικές τάσεις)

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

ρ = η πυκνότητα (Μάζα / Όγκος)

Ελαστικές σταθερές και ταχύτητες ελαστικών κυμάτων χώρου

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα των κυμάτων P και S δίδεται και από τις σχέσεις:

Όπου K είναι ο συντελεστής κυβικής ελαστικότητας, μ = συντελεστής δυσκαμψίας και ρ η πυκνότητα.

Αν η Γη ήταν ομογενής και οι τιμές των K, μ , και ρ ήταν παντού οι ίδιες τότε οι ταχύτητες V_p , V_s θα ήταν σταθερές στο εσωτερικό της Γης και τα σεισμικά κύματα θα ακολουθούσαν ευθείες γραμμές κατά τη διάδοσή τους.


Μια από τις εφαρμογές της Σεισμολογίας είναι ο καθορισμός της μεταβολής των K, μ και ρ με το βάθος μέσα στη Γη και στη συνέχεια η εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την κατανομή της Πίεσης και της Θερμοκρασίας με το βάθος μέσα στη Γη.

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

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

Εύρεση Δομής

- Η πυκνότητα, ρ εξαρτάται από τη σύσταση, την πίεση, και τη θερμοκρασία
 - Υψηλή πίεση σημαίνει ότι το υλικό συμπιέζεται, - > Υψηλότερη Πυκνότητα
 - Υψηλότερη θερμοκρασία σημαίνει ότι το υλικό διαστέλλεται - > μικρότερη πυκνότητα
- Το K και το μ εξαρτώνται από τη σύσταση, την πίεση και τη θερμοκρασία



Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στοιχεία από τον τρόπο που μεταβάλλονται οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων με το βάθος στη Γη για να οδηγηθούμε σε συμπεράσματα σε σχέση με τη σύσταση, την πίεση και τη θερμοκρασία του εσωτερικού της Γης.

Γενικός Κανόνας

- Η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων **αυξάνει** με την **αύξηση της πίεσης** (η οποία είναι σχεδόν μόνο συνάρτηση του βάθους)

και

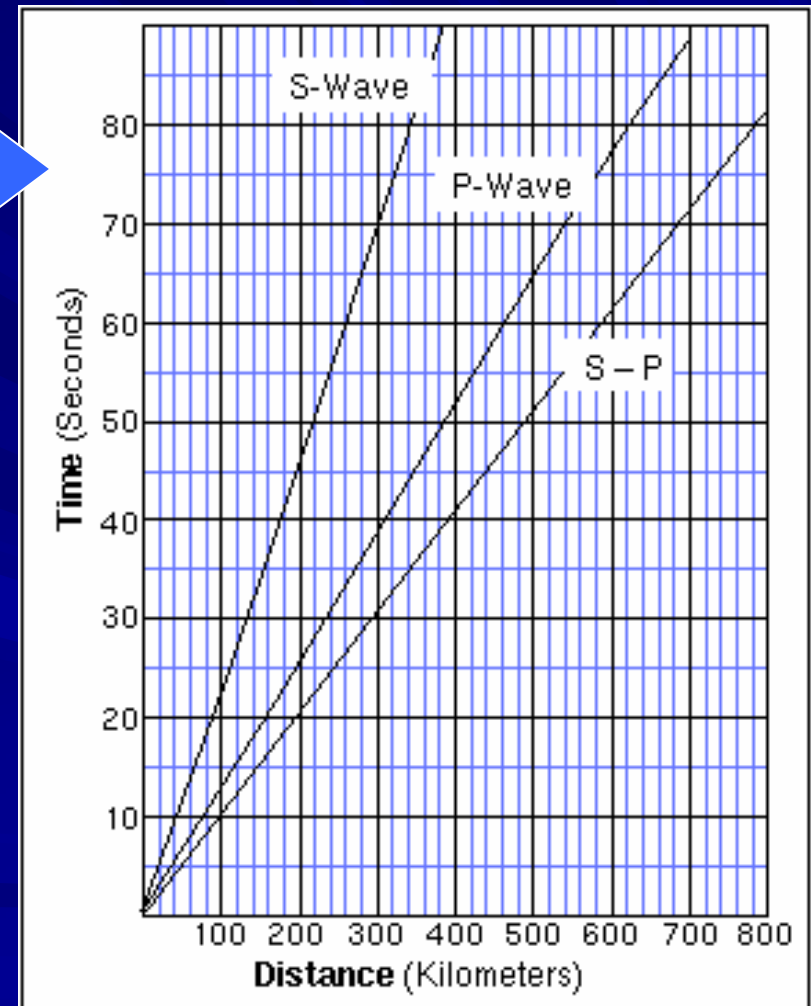
- **Ελαττώνεται** με την **αύξηση** της θερμοκρασίας

Βασικά σεισμολογικά δεδομένα

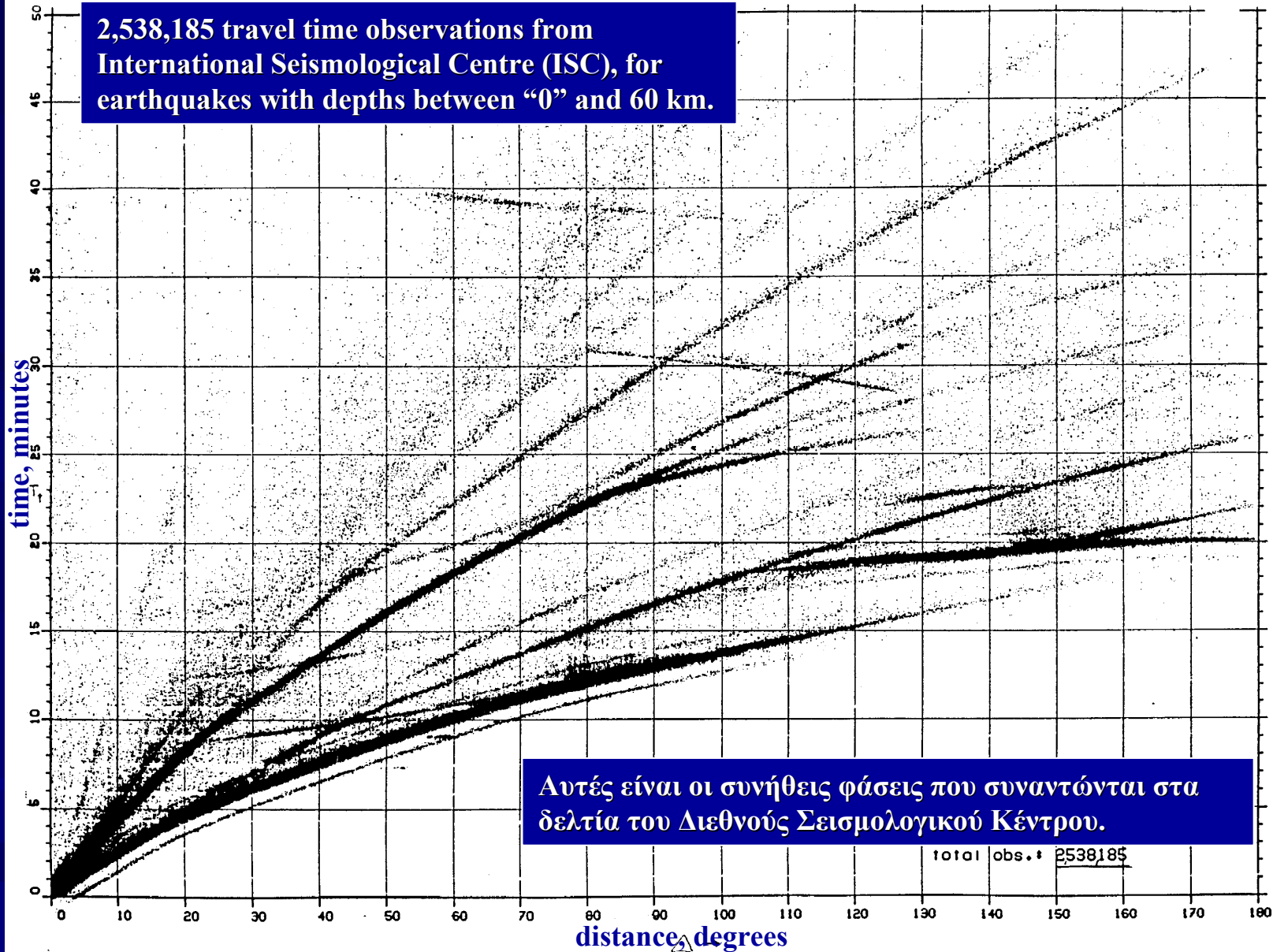
Τα βασικά σεισμολογικά δεδομένα για τη μελέτη του εσωτερικού της Γης είναι οι **καμπύλες χρόνων διαδρομής** των σεισμικών κυμάτων.

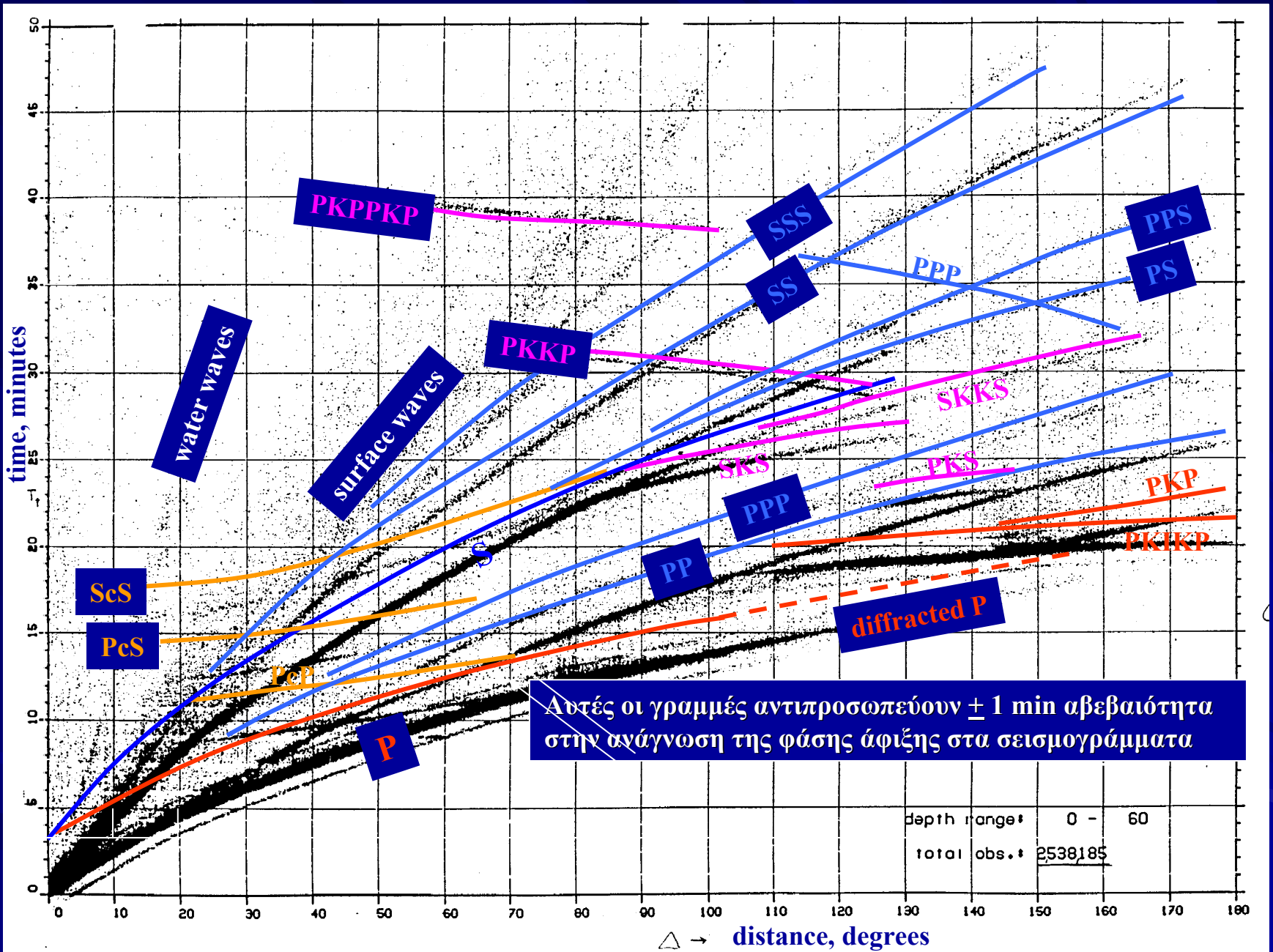
Αυτές βασίζονται σε μετρήσεις των αφίξεων των σεισμικών κυμάτων σε διάφορους δέκτες (σεισμολογικούς σταθμούς = σεισμόμετρα).

Για να μεταβούμε από τις αφίξεις σε καμπύλες χρόνων διαδρομής χρειάζεται να γνωρίζουμε το χρόνο γένεσης και τη θέση της πηγής (επίκεντρο αν πρόκειται για σεισμική πηγή).



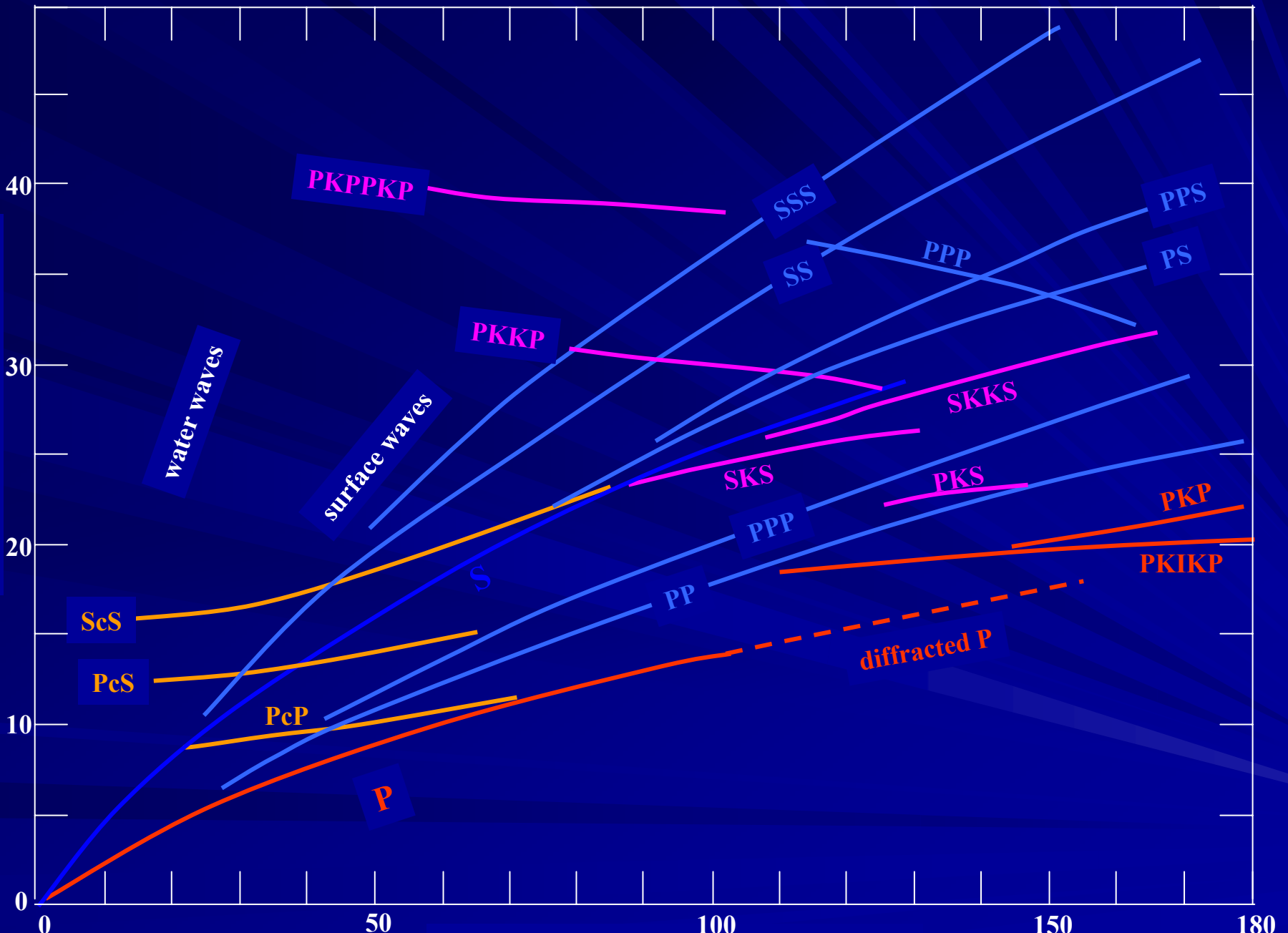
2,538,185 travel time observations from International Seismological Centre (ISC), for earthquakes with depths between "0" and 60 km.





Χρόνος Διαδρομής σε λεπτά

Επικεντρική απόσταση σε μοίρες



Σεισμολογικά δεδομένα σε σχέση με άλλα γεωφυσικά δεδομένα

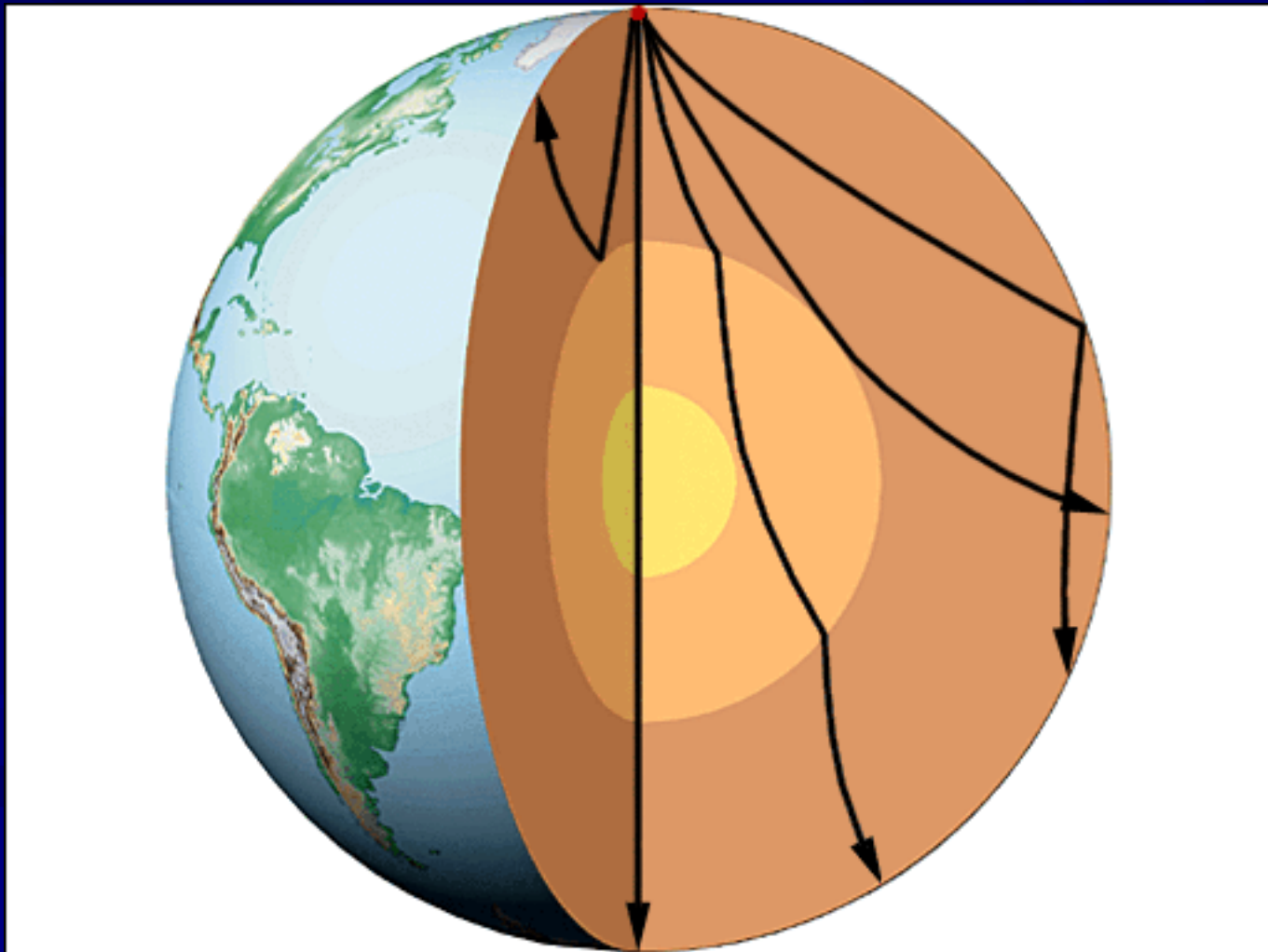
- Σε σχέση με άλλα γεωφυσικά δεδομένα τα σεισμολογικά δεδομένα είναι τα σημαντικότερα όσον αφορά τον καθορισμό της δομής του εσωτερικού της Γης
- **Παράδειγμα:** Ενώ τα μαγνητικά και βαρυτικά δεδομένα δείχνουν την ύπαρξη του πυκνού και ρευστού εξωτερικού πυρήνα, δεν μπορούν όμως να καθορίσουν με ακρίβεια τις διαστάσεις του πυρήνα ή την πυκνότητά του
- Ακόμα η Σεισμολογία παρέχει **Γήινα Μοντέλα** (Earth Models) που περιγράφουν τη ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων καθώς και της πυκνότητας στο εσωτερικό της Γης.

Ελαστικά κύματα

- Μεταβολή των Ταχυτήτων των Σεισμικών Κυμάτων Χώρου με το βάθος

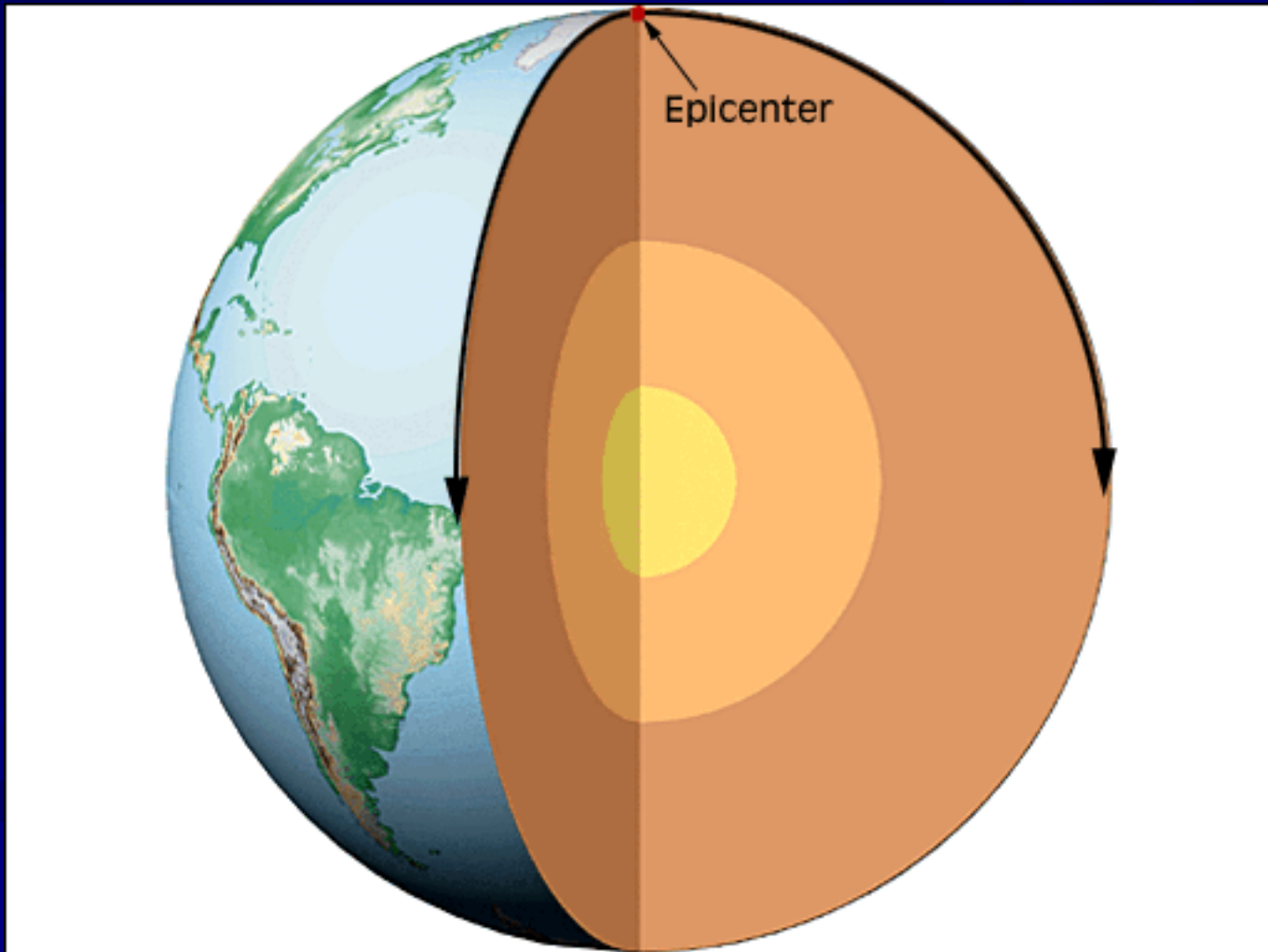
Σεισμικά Κύματα Χώρου

Body Seismic Waves

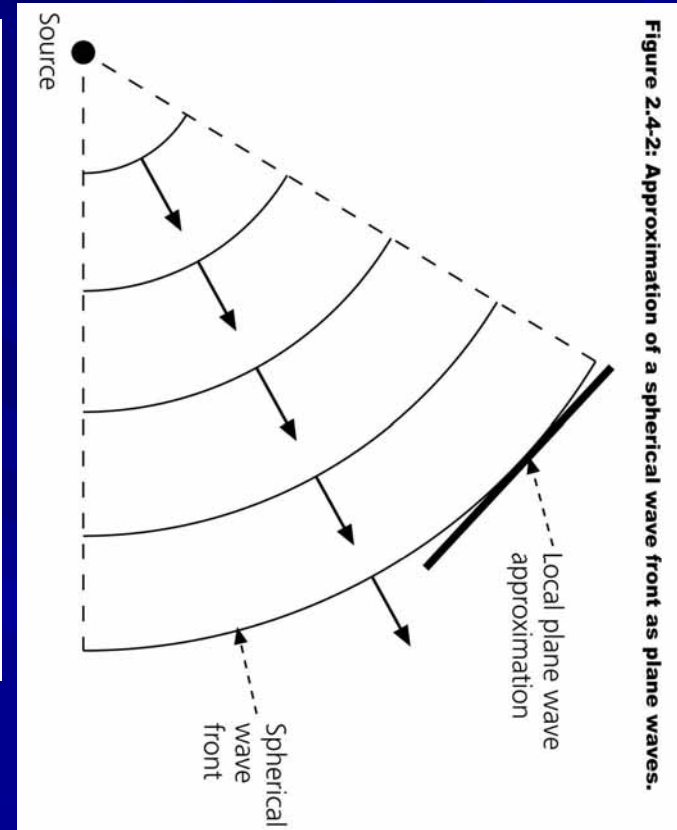
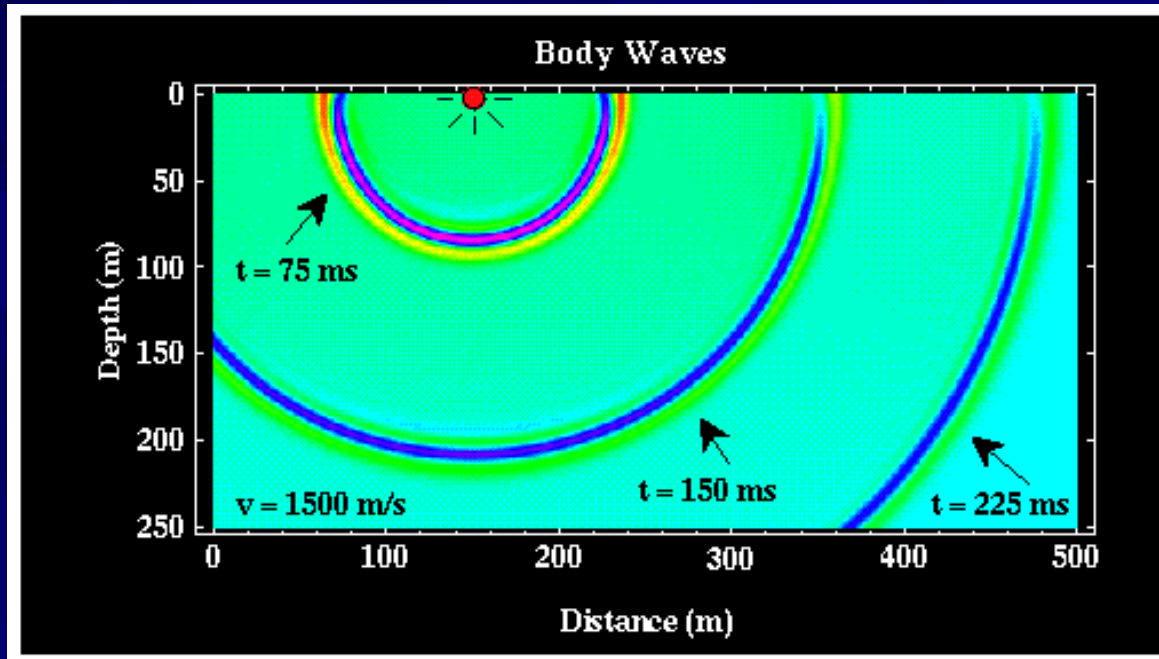


Κυρατζή Α. "Φυσική της Λιθόσφαιρας"

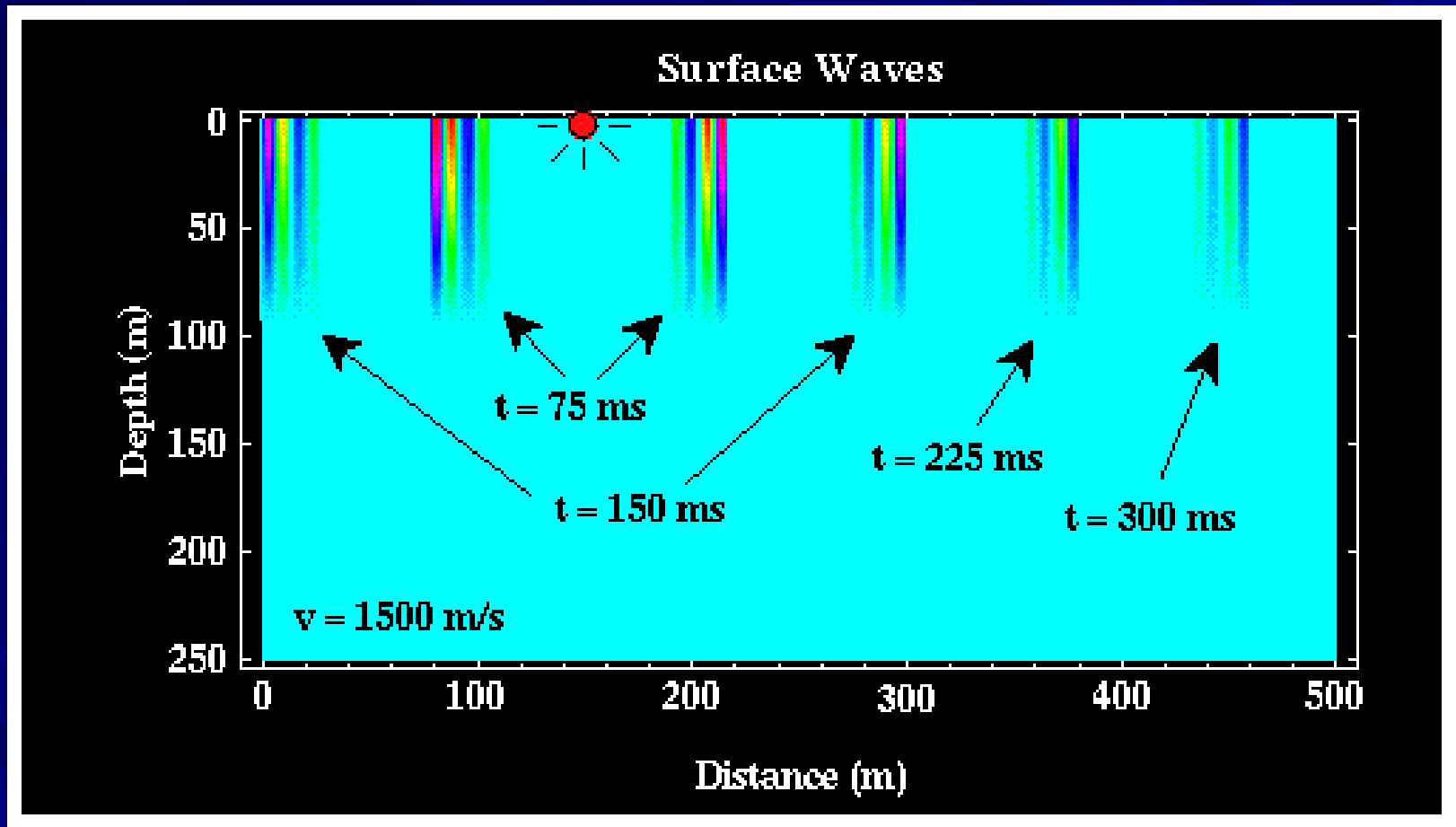
Επιφανειακά κύματα Surface Seismic Waves



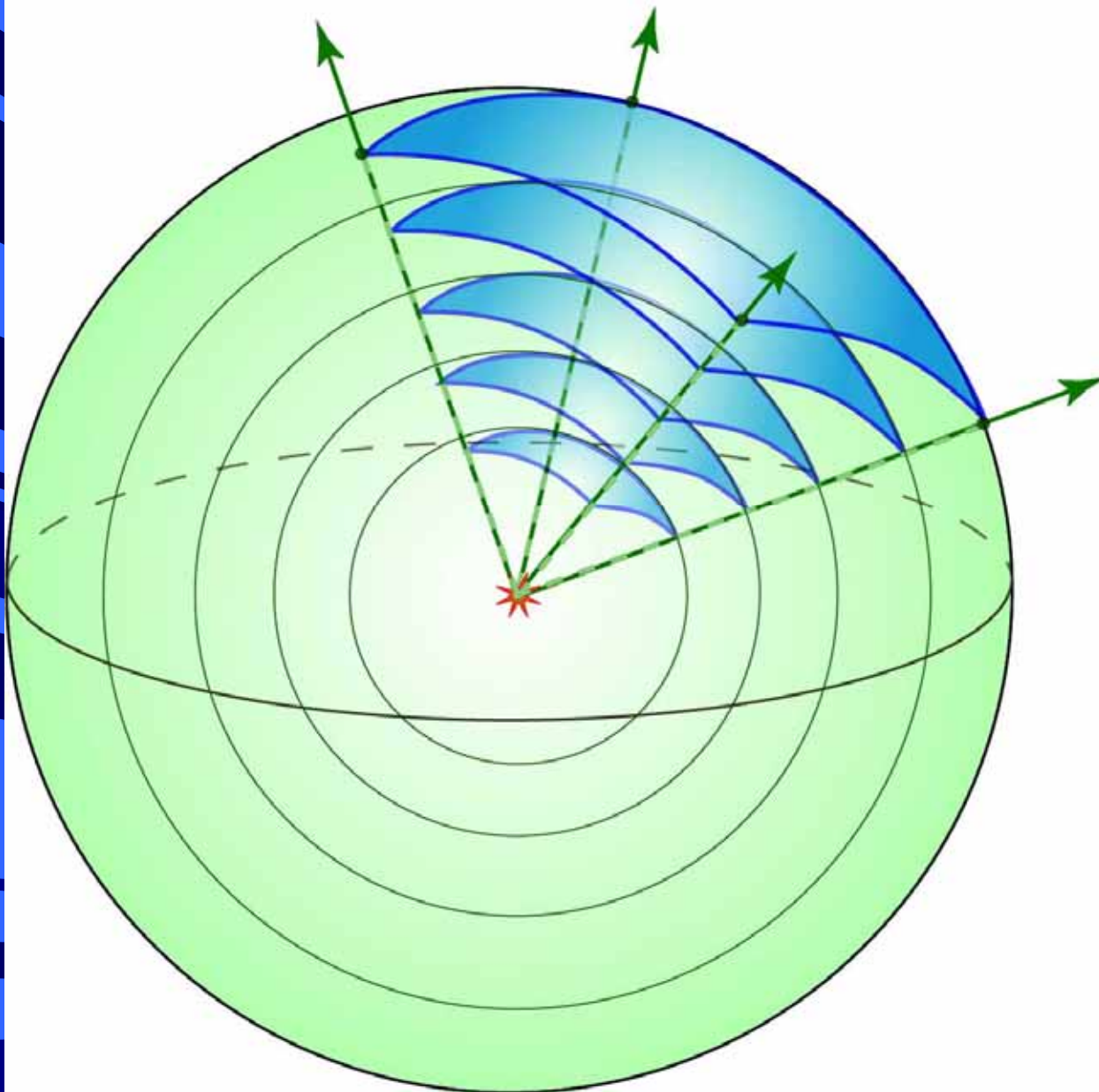
Σφαιρικά & Επίπεδα Κύματα Χώρου



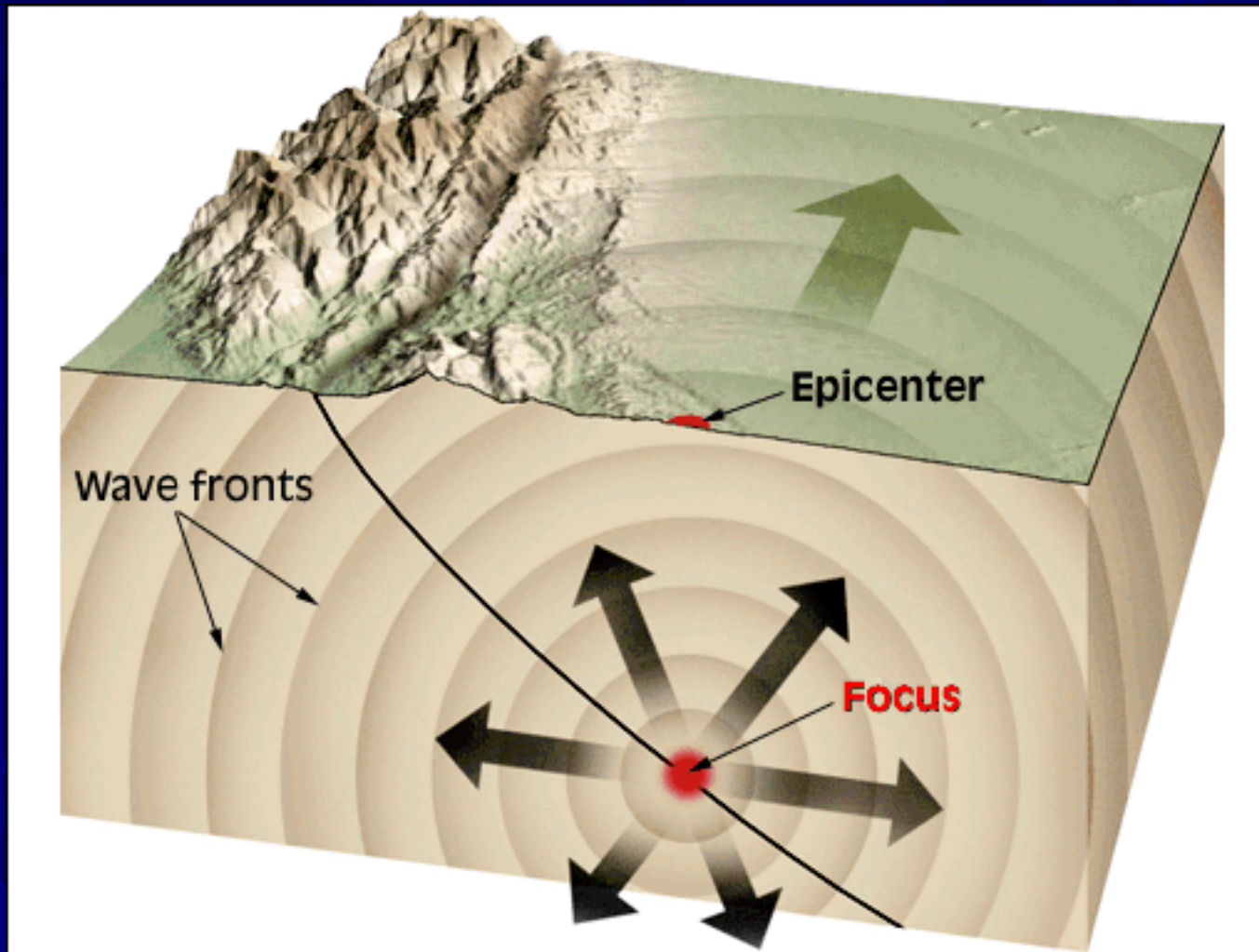
Επιφανειακά Κύματα



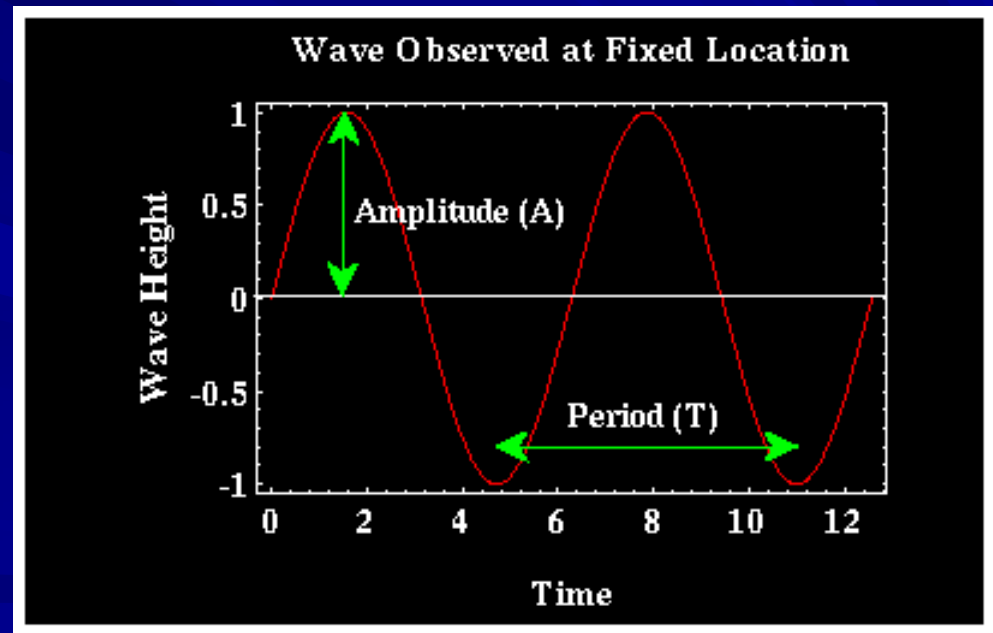
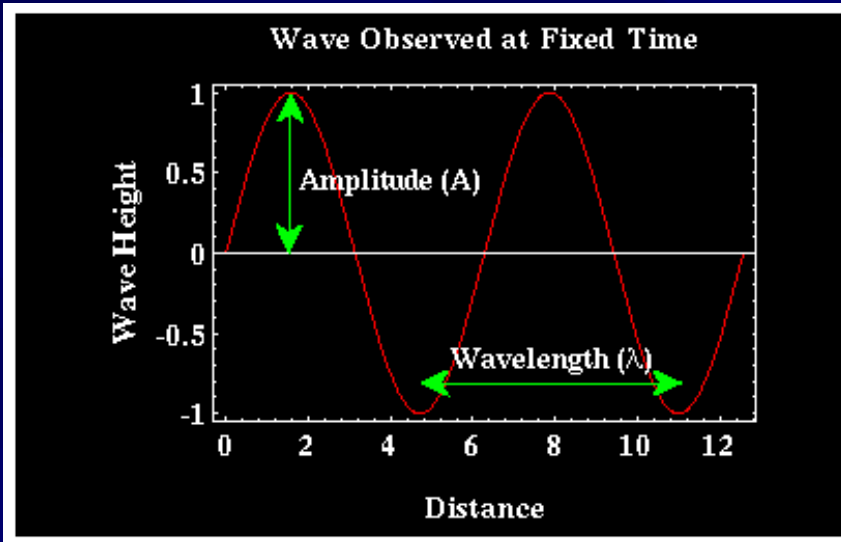
Spherically expanding wavefront in isotropic media: $V_s = \text{constant}$



Εστία & Επίκεντρο – Μέτωπο κύματος



Μήκος Κύματος - Περίοδος



Frequency = $f = V/\lambda$, where V = velocity

Wave types

Body:

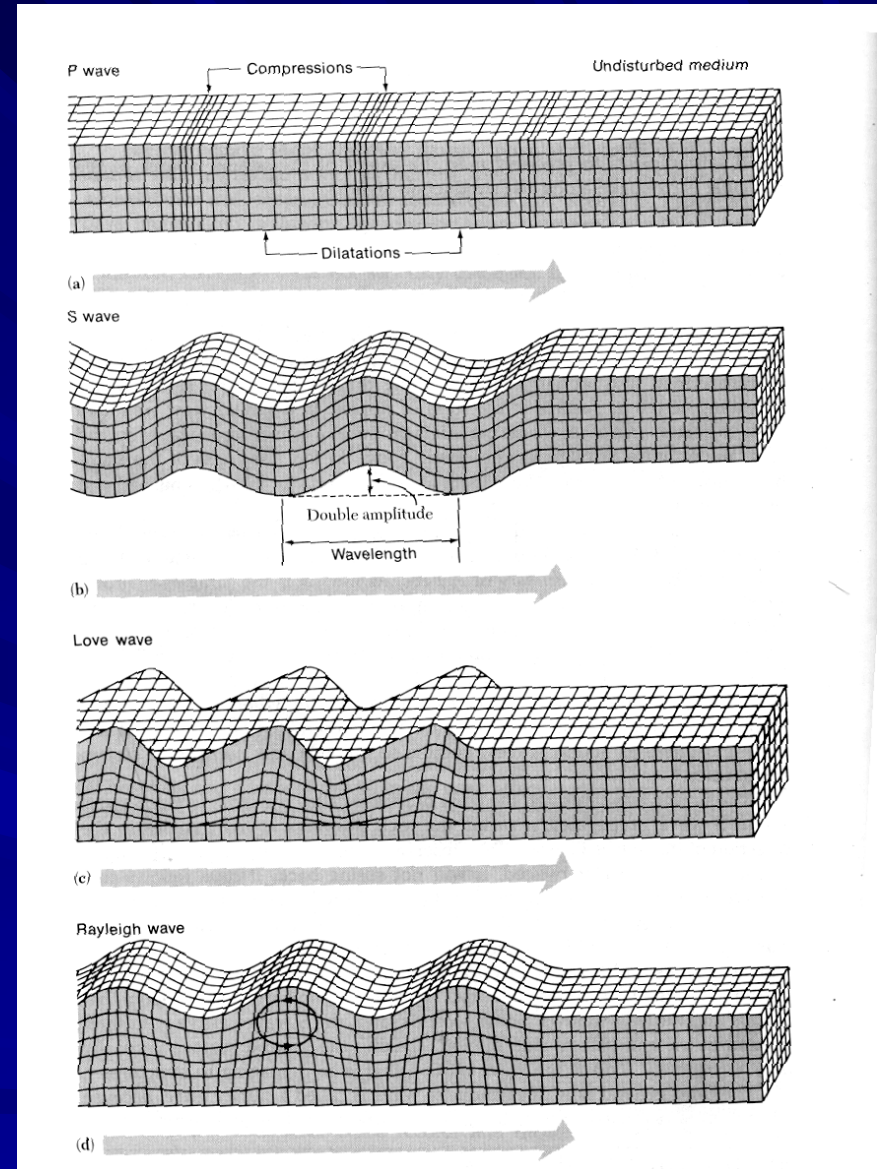
P

S

Surface Waves:

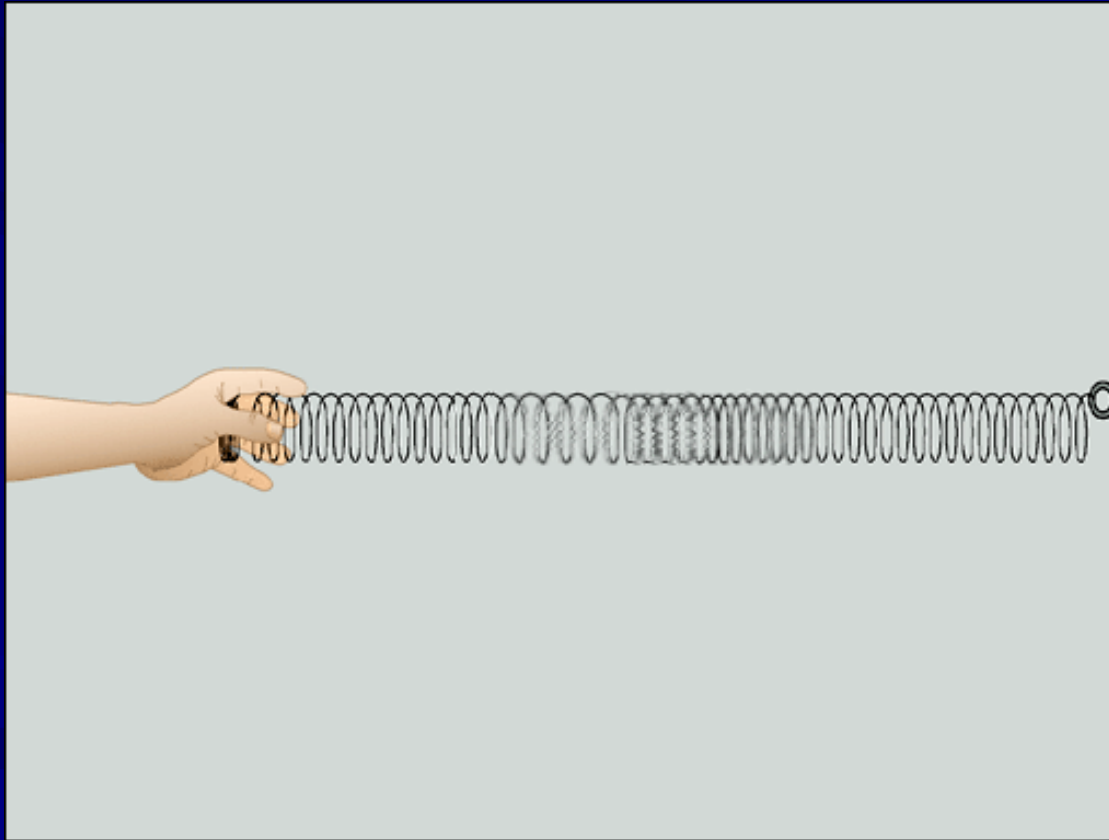
Love (L_Q)

Rayleigh (L_R)



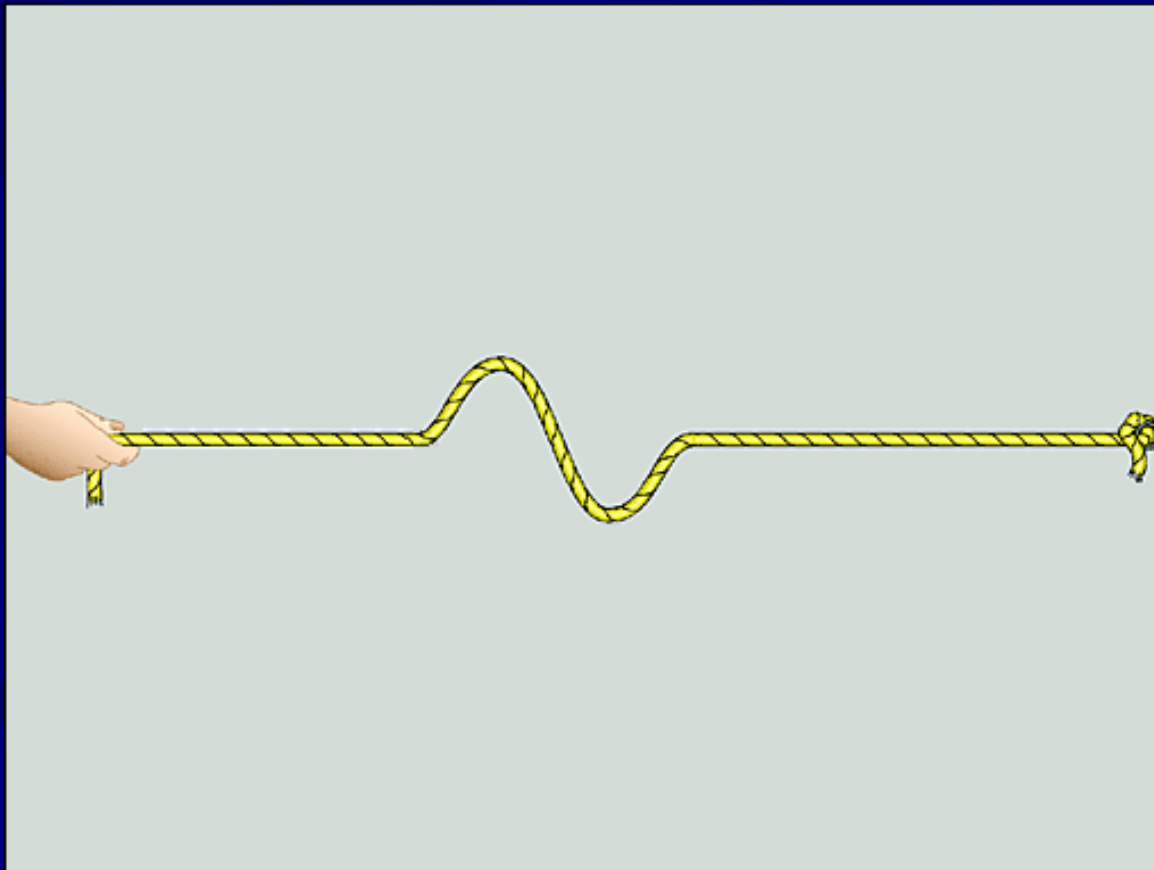
Επιμήκη κύματα

- Μετάθεση των υλικών σημείων // στη διεύθυνση διάδοσης



Εγκάρσια κύματα

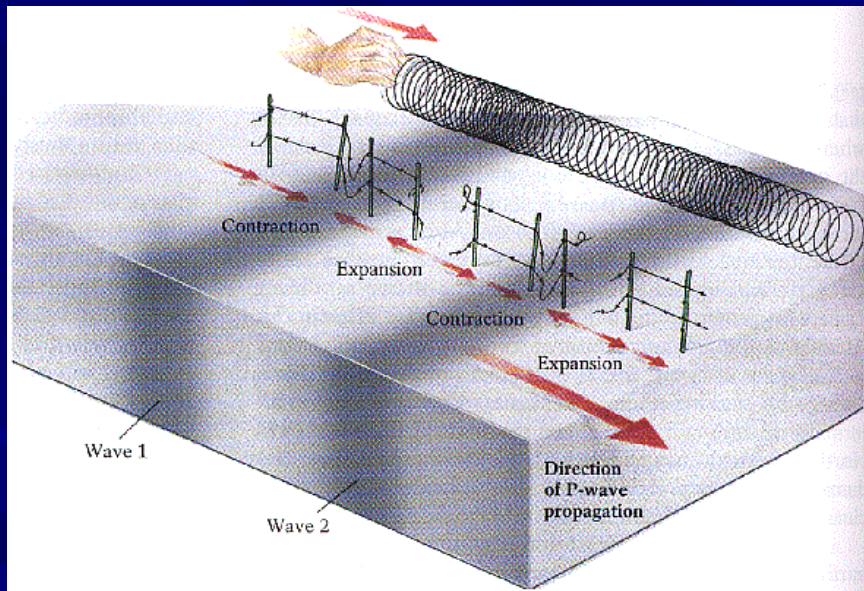
- Μετάθεση των υλικών σημείων κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης



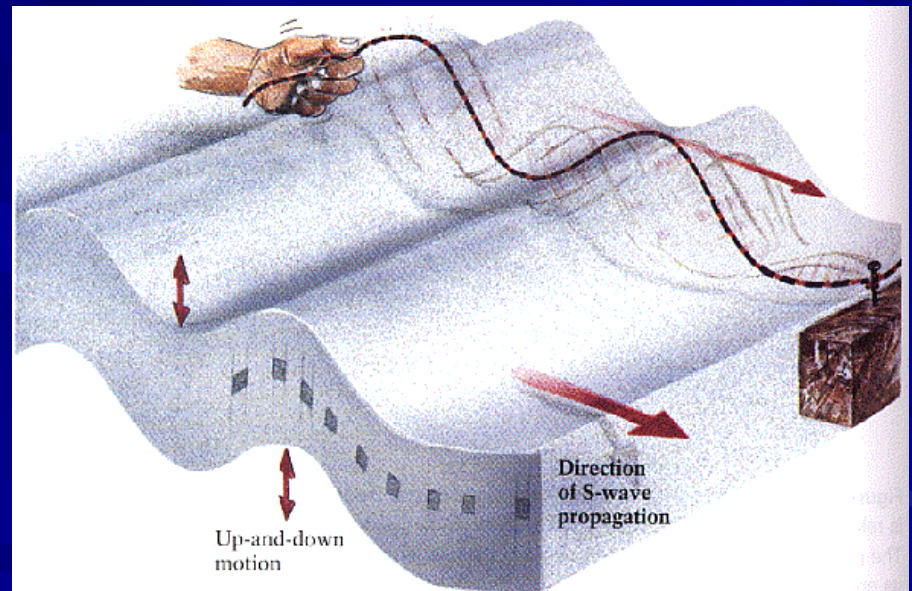
Συνέχεια...

Βασικά στοιχεία για τα σεισμικά κύματα

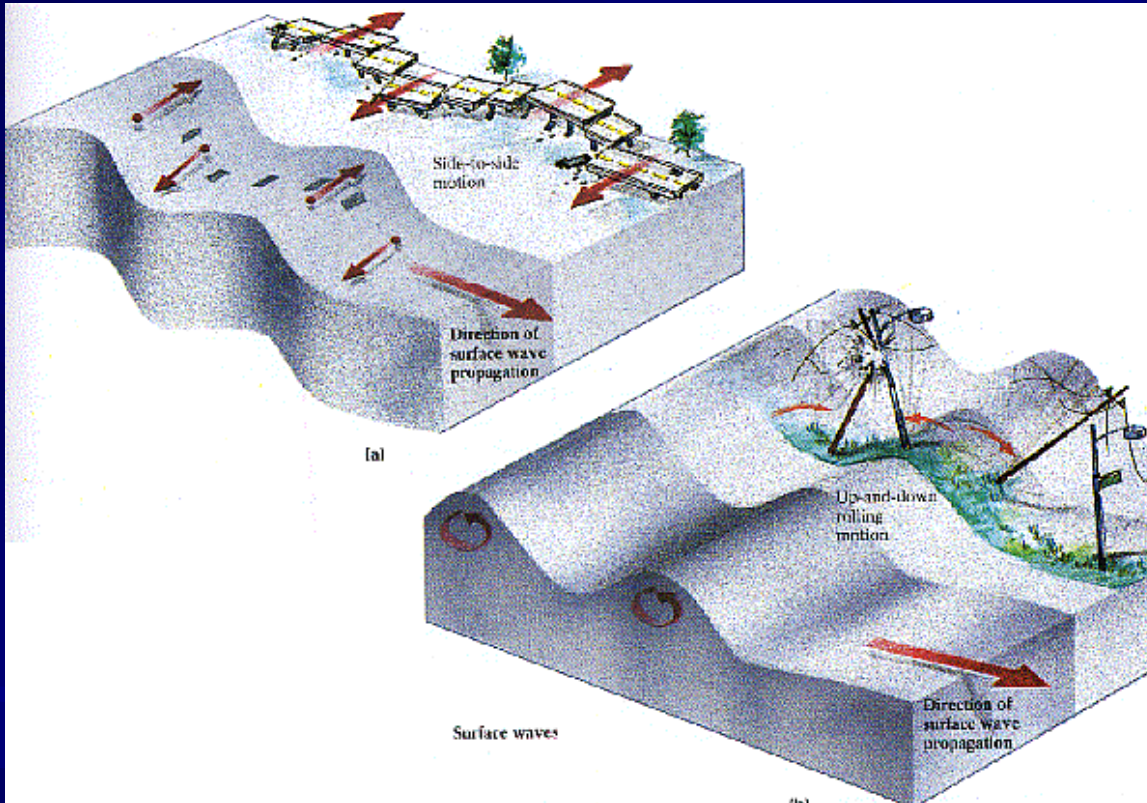
■ ΕΠΙΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΑ



■ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ



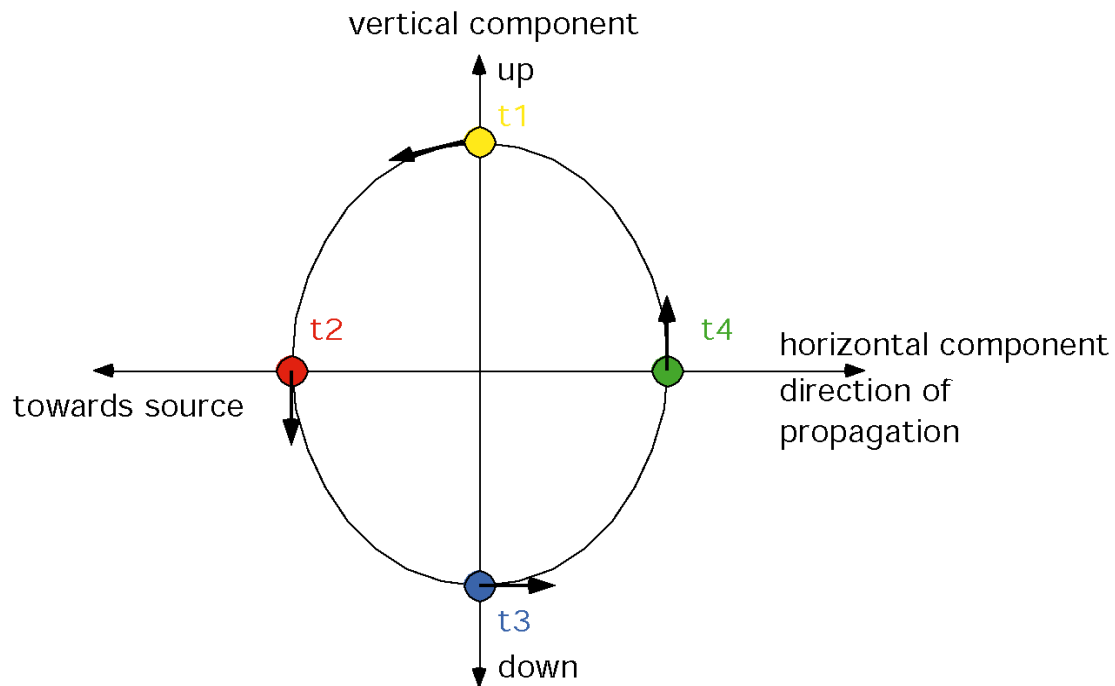
Επιφανειακά Κύματα



- Κάποια από τα κύματα χώρου διαδίδονται προς την επιφάνεια της Γης (μόνο στα πάνω χιλιόμετρα του φλοιού)
- Μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από όλα τα είδη των σεισμικών κυμάτων
- Διαδίδονται μόνο στα στερεά
- Rayleigh & Love

Επιφανειακά Κύματα Rayleigh

Κινήσεις υλικών σημείων κατά τη διέλευση των κυμάτων Rayleigh σε κατακόρυφη τομή και κατά τις χρονικές στιγμές t_1 , t_2 , t_3 και t_4 για απλές ημιτονοειδείς ταλαντώσεις



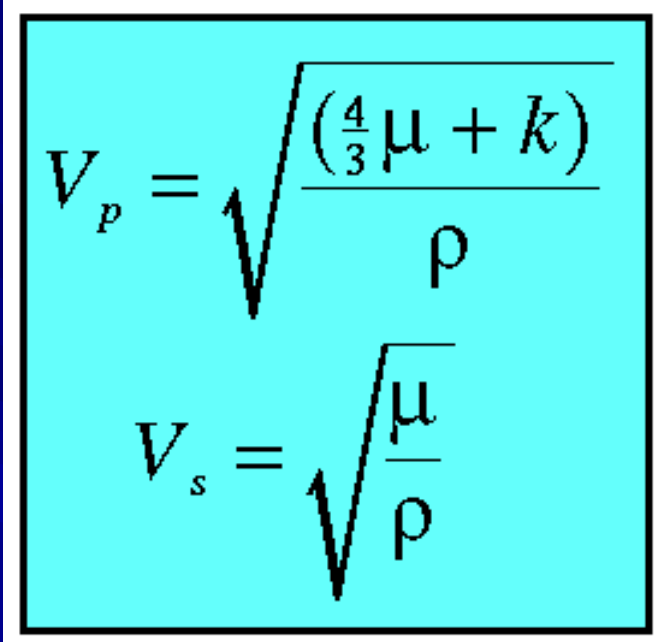
Ταχύτητες σεισμικών κυμάτων

Material	V_p (m/s)	V_s (m/s)
Air	332	
Water	1400-1500	
Petroleum	1300-1400	
Steel	6100	3500
Concrete	3600	2000
Granite	5500-5900	2800-3000
Basalt	6400	3200
Sandstone	1400-4300	700-2800
Limestone	5900-6100	2800-3000
Sand (Unsaturated)	200-1000	80-400
Sand (Saturated)	800-2200	320-880
Clay	1000-2500	400-1000
Glacial Till (Sat.)	1500-2500	600-1000

Ταχύτητες

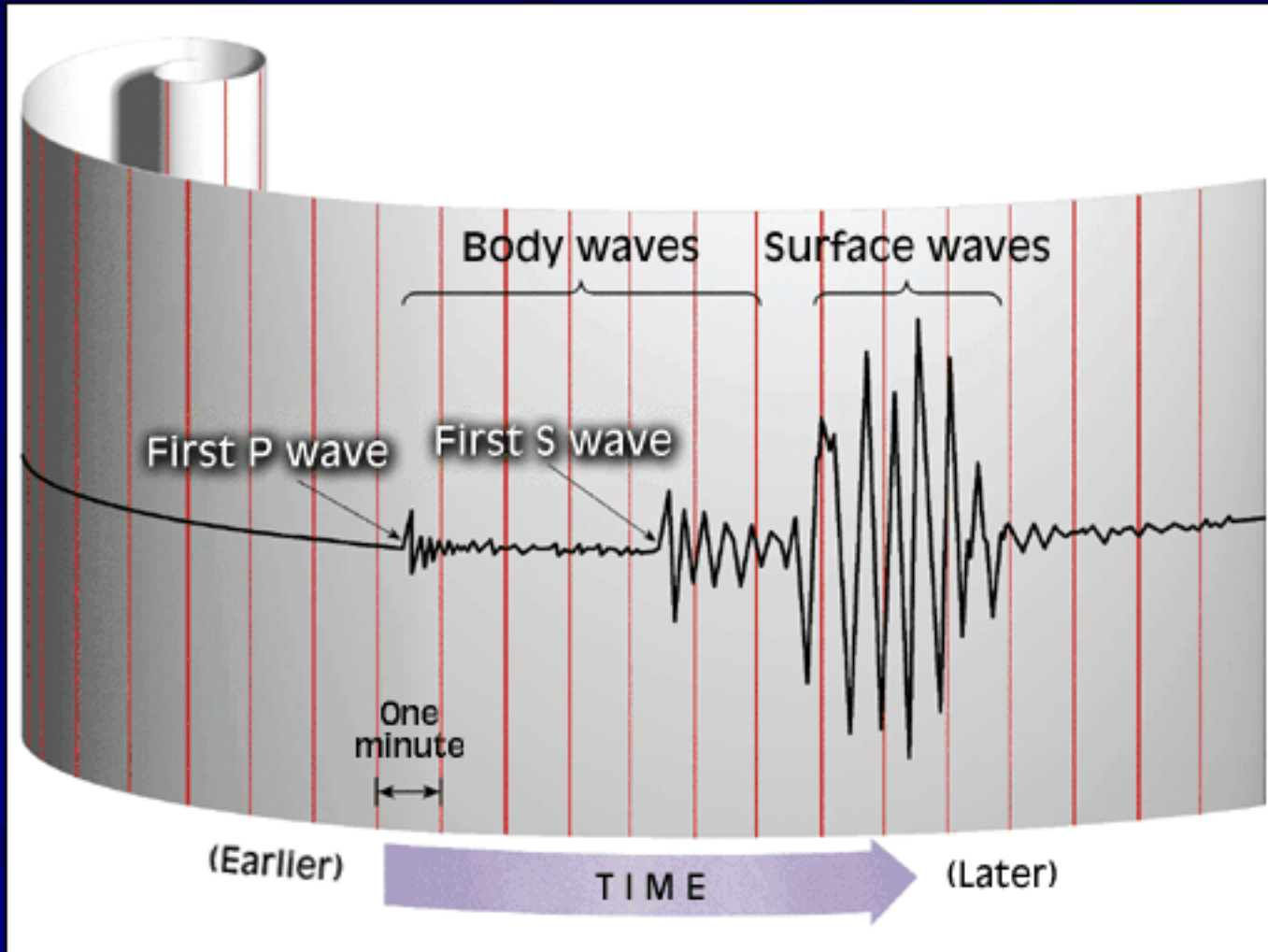
$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{P wave}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{S wave}$$


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

Καθώς το λ , k έχουν πάντα θετική τιμή, $V_p > V_s$; $V_p \sim 2 V_s$

Χρόνοι διαδρομής



Σεισμογράμματα

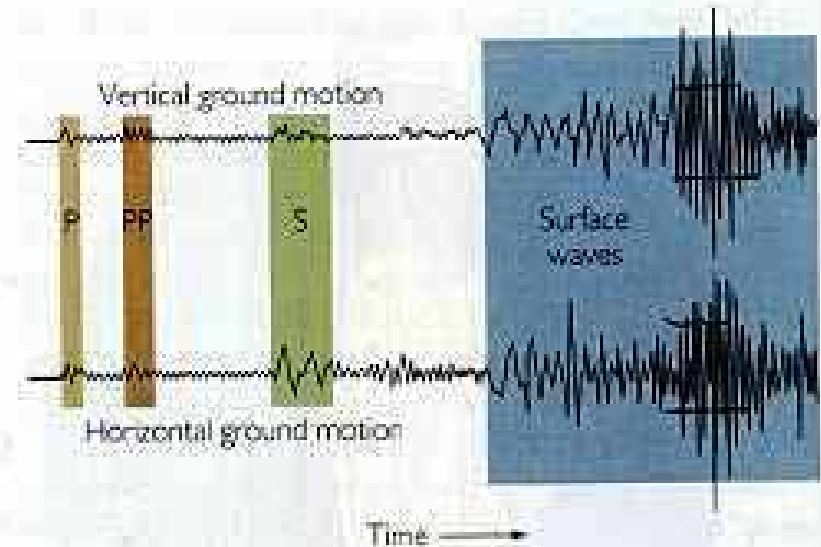
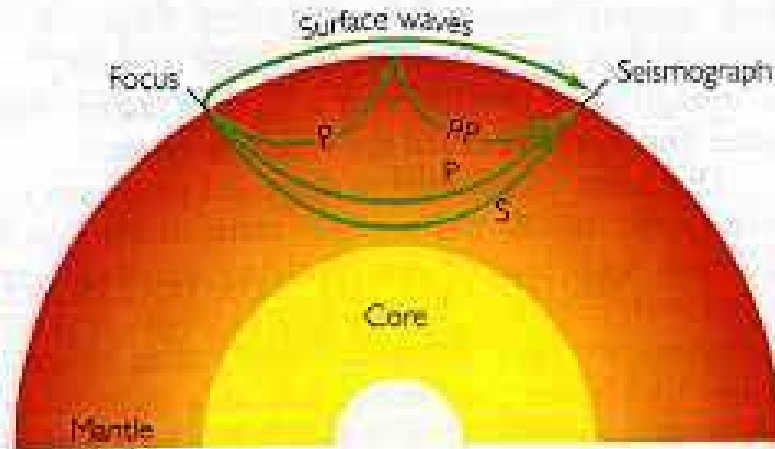
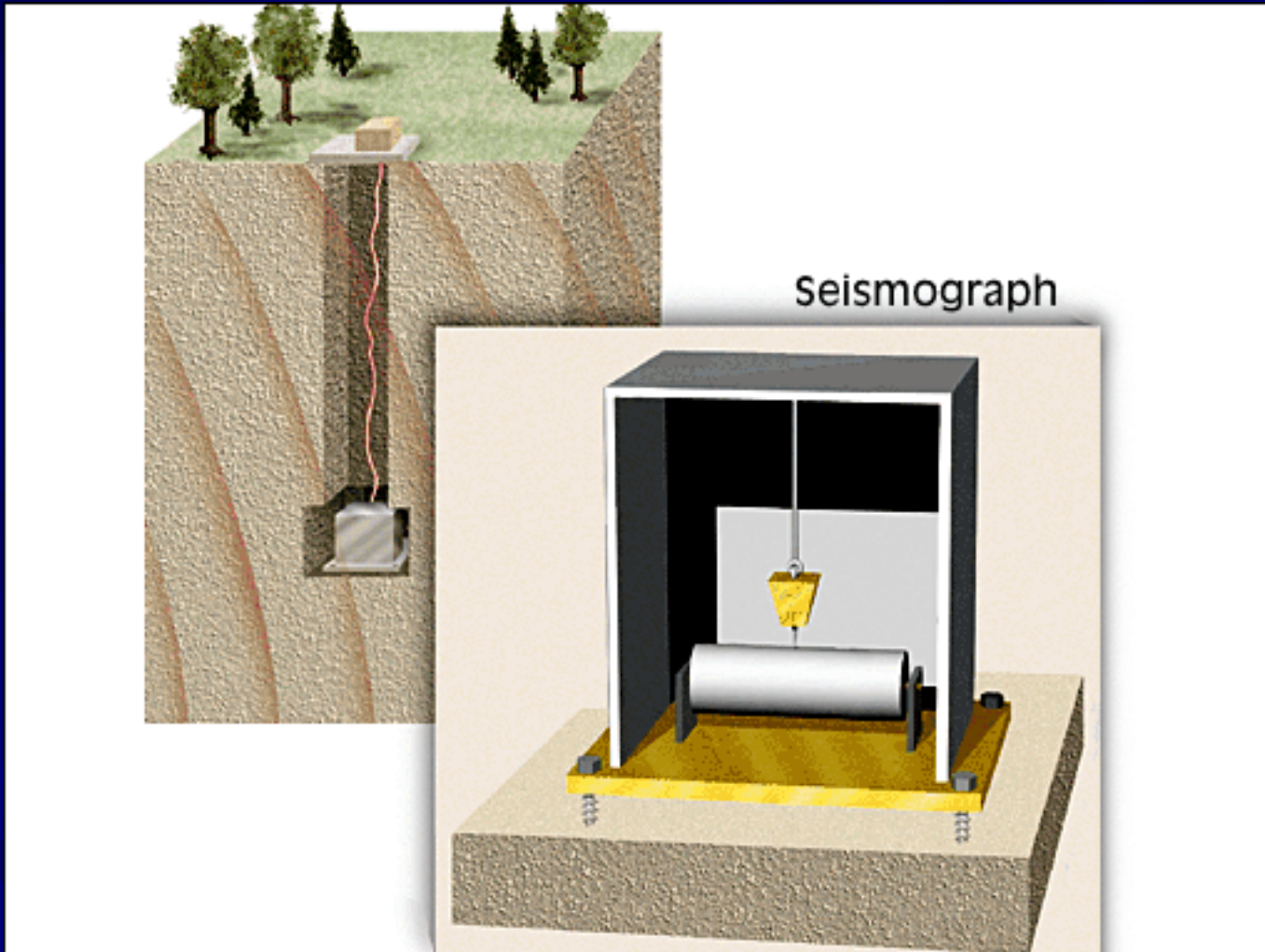


FIGURE 19.4 Seismographic recording of P, PP, S, and surface waves from a distant earthquake.

Σεισμογράφοι



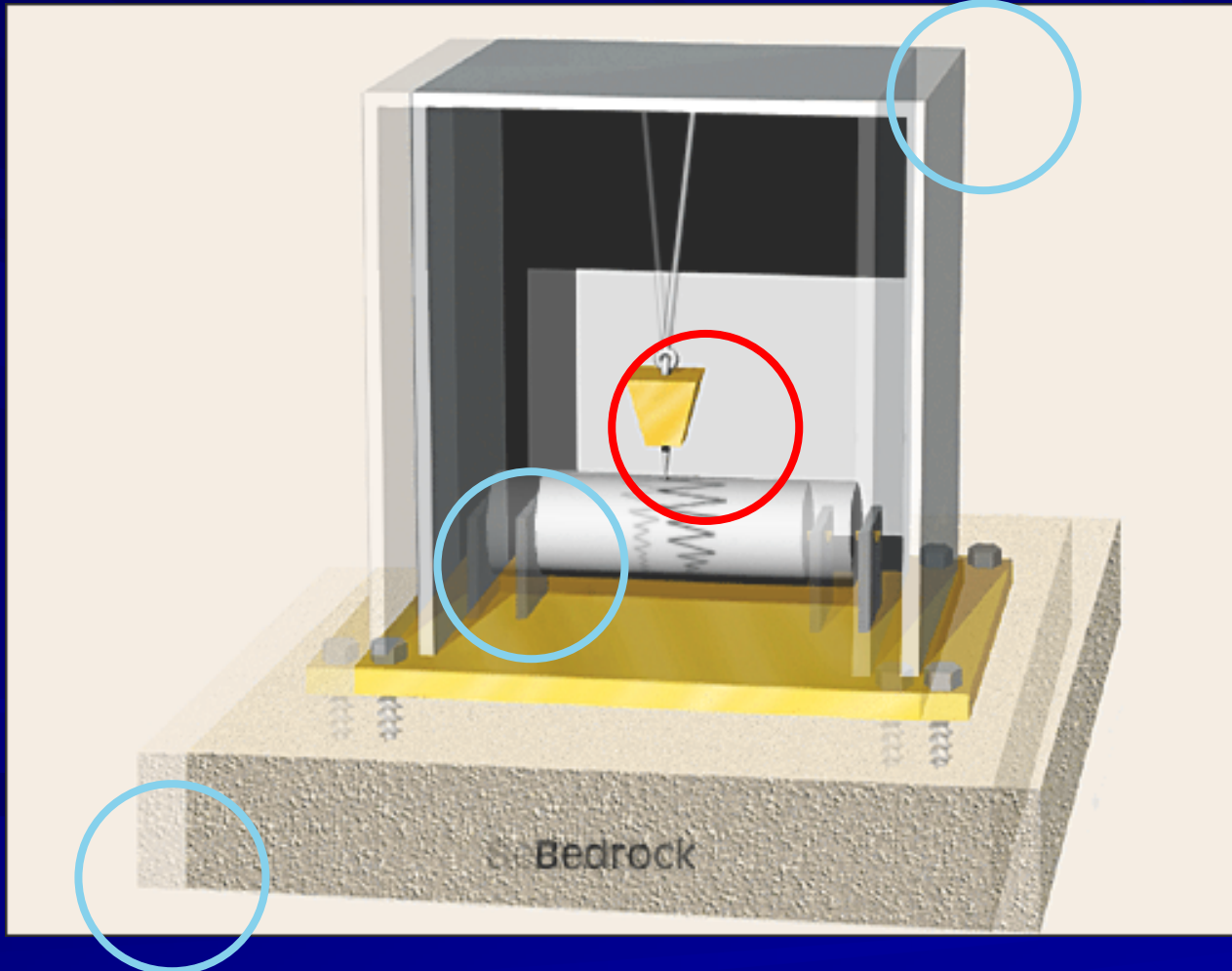
Και ο παλιός Κινέζικος

- Οι μπάλες που πέφτουν δείχνουν την κατεύθυνση ως προς το επίκεντρο



Σεισμογράφοι

- Η **μάζα** είναι ακίνητη λόγω αδράνειας
- Το **τύμπανο** και οι **βάσεις στήριξης** κινούνται



Πώς συμβολίζουμε τα σεισμικά κύματα στο εσωτερικό της Γης

■ Μανδύας

- **P, S** : απευθείας διάδοση από την πηγή στο σταθμό
- **PP** ή **SS**: μια ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης
- **PPP, SSS, ...** δυο ανακλάσεις στην επιφάνεια της Γης και μετά διάδοση προς το σταθμό

■ Πυρήνας

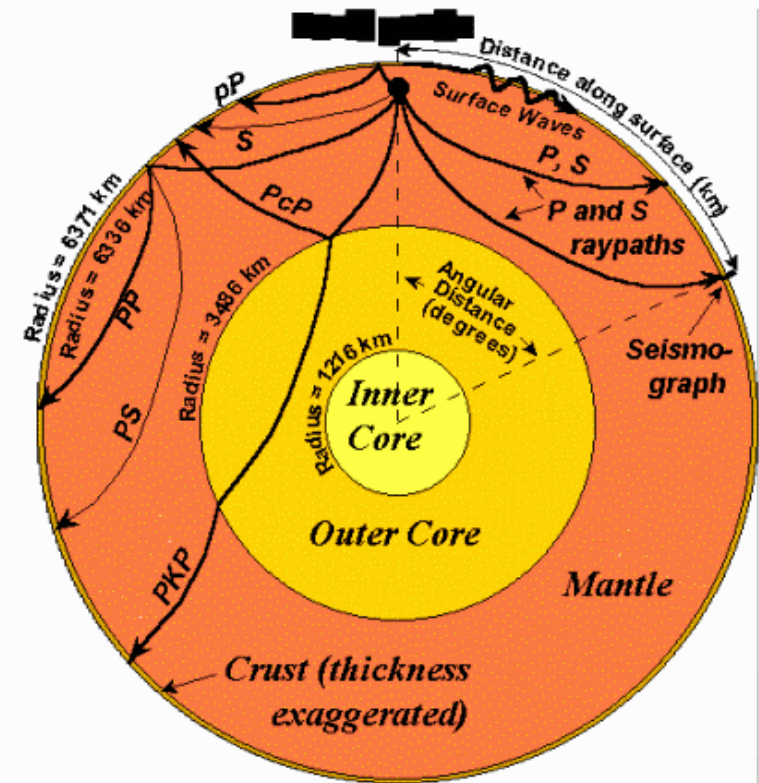
- **P** κύματα στον εξωτερικό πυρήνα συμβολίζονται ως **K** (από τη γερμανική λέξη Kern = πυρήνας)
- **P** κύματα στον εξωτερικό πυρήνα συμβολίζονται ως **I**
- **S** κύματα στον εσωτερικό πυρήνα συμβολίζονται ως **J**

- **Φάσεις βάθους**: συμβολίζονται ως **pP** ή **sS** [σε περίπτωση που κύμα **P** ή **S** διαδίδεται πρώτα από την πηγή προς την επιφάνεια της Γης, μετά ανακλάται και στη συνέχεια διαδίδεται στο μανδύα ως **P** ή **S**].

■ Παράδειγμα: **PKIKP**

- διάδοση στο μανδύα ως **P**, διάδοση στο έξω και έσω πυρήνα και μετά ξανά μέσα στο μανδύα ως **P**

Tracing seismic rays



Παραδείγματα

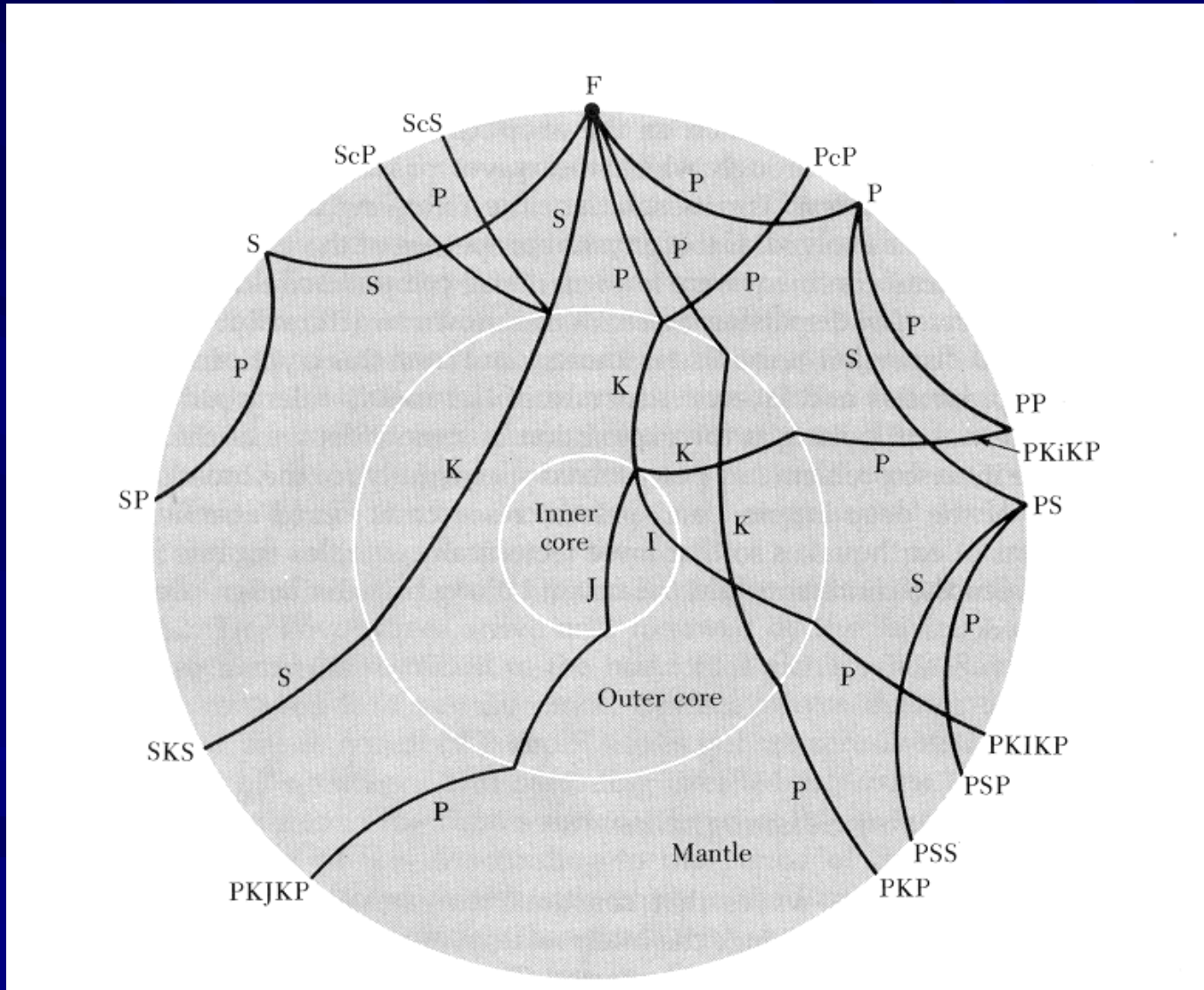
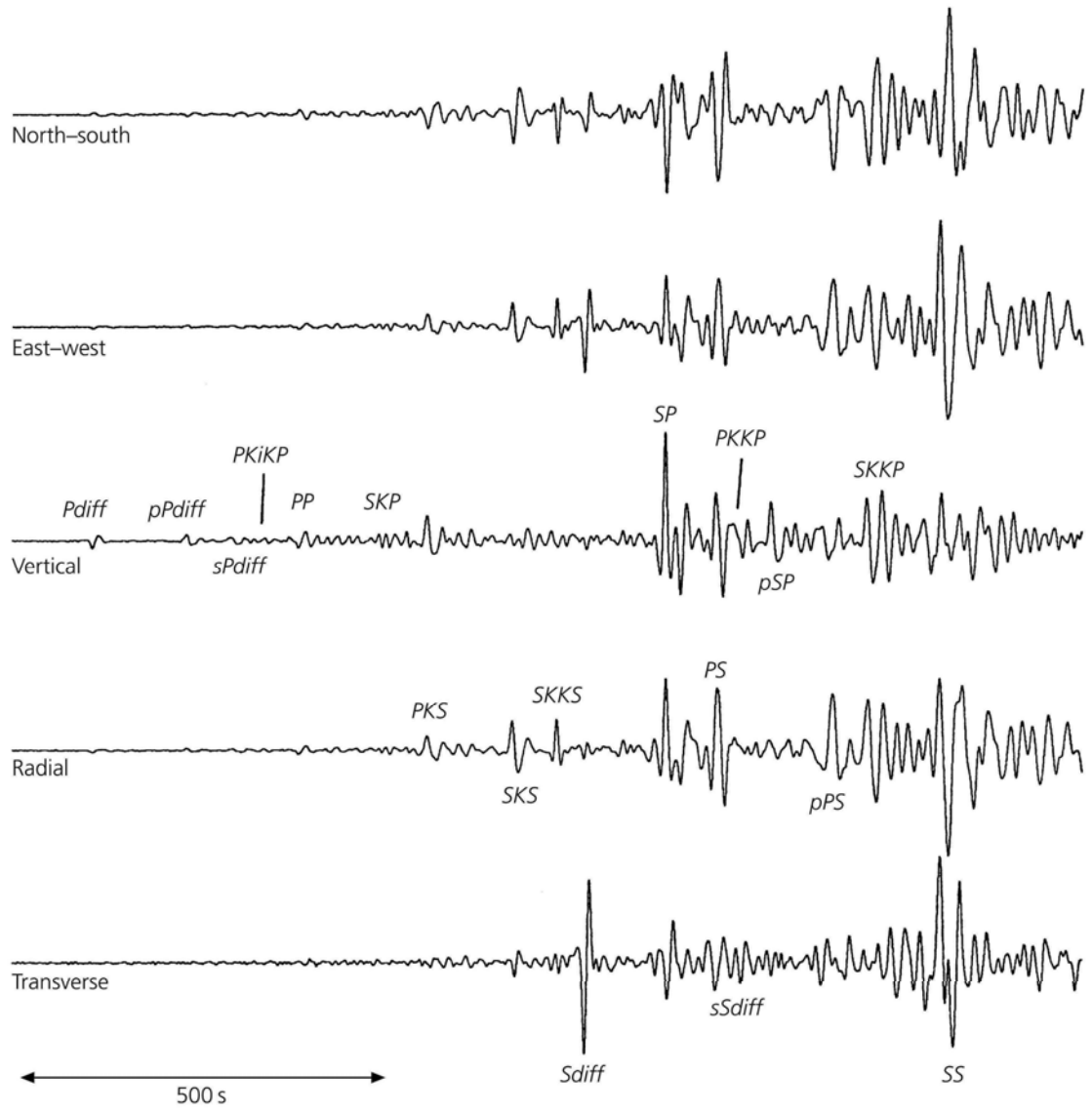


Figure 2.4-5: Seismograms for a deep earthquake recorded at a distance of 110°.



**Και οι αναγραφές
στα
σειсмоγράμματα**