

## *Μάθημα 5<sup>ο</sup>*

### *Σεισμικά Κύματα και Διάδοση Αυτών στο Εσωτερικό της Γης*

- Εστιακές παράμετροι του σεισμού (επίκεντρο, χρόνος γένεσης, κλπ.)
- Καμπύλες χρόνων διαδρομής κυμάτων χώρου
- Μεταβολή των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χώρου μέσα στη Γη
- Διάδοση των επιφανειακών κυμάτων μέσα στη Γη
- Ελεύθερη ταλάντωση της Γης
- Μεταβολή των πλατών των σεισμικών κυμάτων μέσα στη Γη κατά τη διάδοσή τους

# Σεισμικά Κύματα και Διάδοση Αυτών στο Εσωτερικό της Γης

Τα ελαστικά κύματα που παράγονται με φυσικό ή τεχνητό τρόπο μέσα ή πάνω στην επιφάνεια της Γης και διαδίδονται μέσα σ' αυτή λέγονται **σεισμικά κύματα**

## Κύματα χώρου

- Επιμήκη κύματα **P**
- Εγκάρσια κύματα **S**

## Επιφανειακά Κύματα

- Κύματα **Rayleigh**
- Κύματα **Love**
- Κύματα **Stonley**

**Άλλα είδη κυμάτων:**

- Διαυλικά κύματα
- Κύματα ουράς
- Στάσιμα κύματα → Ελεύθερη ταλάντωση της Γης

### Αντικείμενα του Μαθήματος

- ▶ Εστιακές παράμετροι του σεισμού (επίκεντρο, χρόνος γένεσης, κλπ.)
- ▶ Καμπύλες χρόνων διαδρομής κυμάτων χώρου
- ▶ Μεταβολή των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χώρου μέσα στη Γη
- ▶ Διάδοση των επιφανειακών κυμάτων μέσα στη Γη
- ▶ Ελεύθερη ταλάντωση της Γης
- ▶ Μεταβολή των πλάτων των σεισμικών κυμάτων μέσα στη Γη κατά τη διάδοσή τους

## Εστία, επίκεντρο και χρόνος γένεσης σεισμού

● **Εστία του σεισμού:** Η διάρρηξη των πετρωμάτων, που προκαλεί ένα σεισμό, αρχίζει σε ορισμένο χώρο και διαδίδεται πάνω στο σεισμικό ρήγμα με ορισμένη ταχύτητα μέχρι να σταματήσει. Ο χώρος που αρχίζει η διάρρηξη μπορεί, σε πρώτη προσέγγιση, να θεωρηθεί σημείο. Το σημείο αυτό λέγεται μικροσεισμική εστία του σεισμού ή μικροσεισμικό υπόκεντρο.

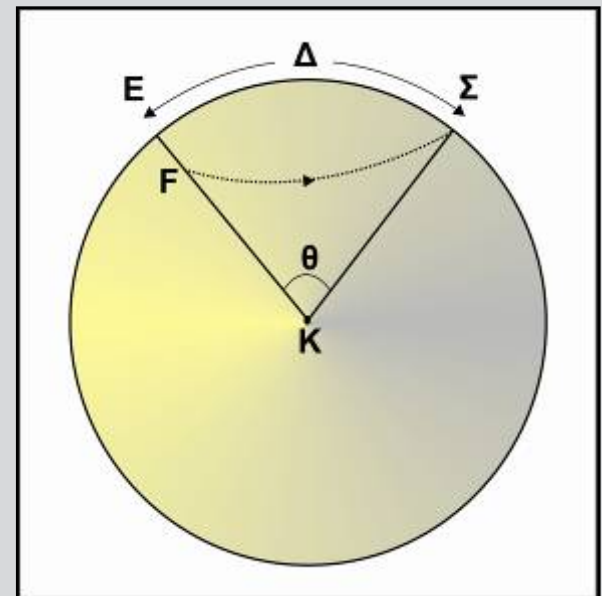
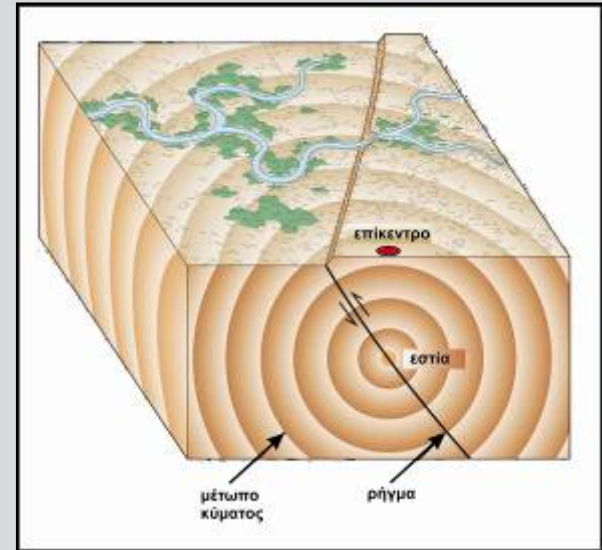
● **Επίκεντρο:** Το σημείο όπου τέμνει την επιφάνεια της Γης η κατακόρυφη που περνάει από τη μικροσεισμική εστία λέγεται μικροσεισμικό επίκεντρο.

● **Εστιακό βάθος** λέγεται η απόσταση μεταξύ της εστίας ενός σεισμού και του επικέντρου.

● **Μακροσεισμικό επίκεντρο.** Τα μακροσεισμικά αποτελέσματα ενός σεισμού (βλάβες, κλπ) είναι μέγιστα σε ένα τμήμα της επιφάνειας της Γης. Το κέντρο του τμήματος αυτού λέγεται μακροσεισμικό επίκεντρο. Το μακροσεισμικό επίκεντρο ενός σεισμού δεν συμπίπτει πάντοτε με το μικροσεισμικό επίκεντρο αυτού.

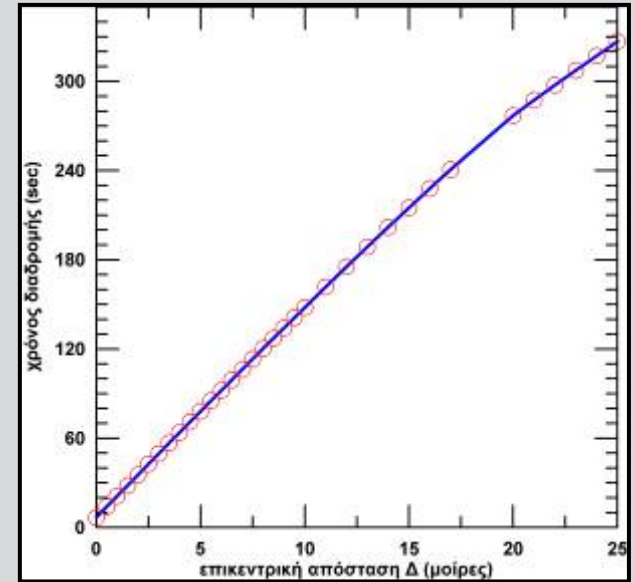
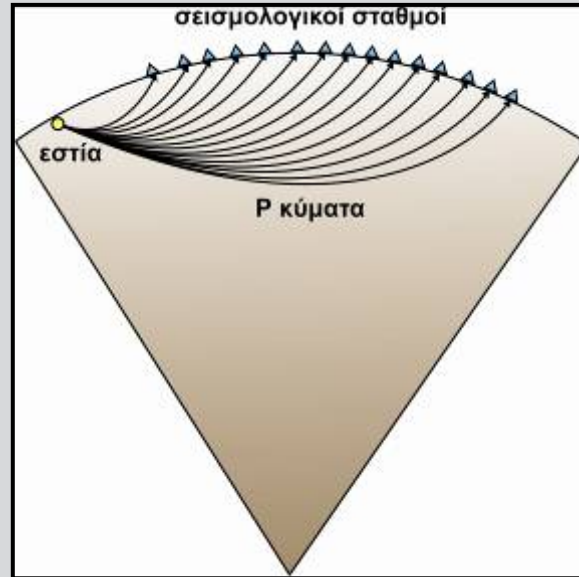
● **Επικεντρική απόσταση**,  $\Delta$ , του επικέντρου του σεισμού,  $E$ , από το σταθμό,  $\Sigma$ , λέγεται το μήκος του τόξου μέγιστου κύκλου που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια της Γης μεταξύ του σταθμού και του επικέντρου ή η αντίστοιχη επικεντρική γωνία  $\theta$ . Η επικεντρική απόσταση μετριέται σε km ή μοίρες (1 μοίρα  $\approx$  111.11 km).

● **Χρόνος διαδρομής** ενός κύματος, είναι ο χρόνος στον οποίο το κύμα διατρέχει το τμήμα του δρόμου που διαγράφεται από τη σεισμική ακτίνα μεταξύ της εστίας και ενός σταθμού. Είναι φανερό ότι ο χρόνος άφιξης ενός κύματος σε ένα σταθμό είναι το άθροισμα του χρόνου γένεσης και του χρόνου διαδρομής αυτού.



## Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων χώρου

Τα **κύματα χώρου**, που γεννιούνται στην **εστία** ενός σεισμού, διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και φθάνουν στην επιφάνειά της, σε σημεία όπου υπάρχουν σεισμολογικοί σταθμοί (δεξιά). Αν η εστία και ο χρόνος γένεσης του σεισμού είναι γνωστά μπορούμε να υπολογίσουμε τις **επικεντρικές αποστάσεις** και τους αντίστοιχους **χρόνους διαδρομής**.



**Καμπύλη χρόνων διαδρομής.**

Αν αυτό επαναληφθεί για πολλούς σεισμούς, τότε μπορούμε να κατασκευάσουμε πίνακες που να δίνουν τους **χρόνους διαδρομής**, **t**, σε συνάρτηση με τις **επικεντρικές αποστάσεις**, **Δ**, οι οποίοι λέγονται **πίνακες χρόνων διαδρομής** (κάτω δεξιά).

Οι **γραφικές παραστάσεις** των σχέσεων μεταξύ των χρόνων διαδρομής και των επικεντρικών αποστάσεων λέγονται **καμπύλες χρόνων διαδρομής** (πάνω δεξιά). Η μορφή των καμπύλων χρόνων διαδρομής εξαρτάται από τον τρόπο μεταβολής των ταχυτήτων των κυμάτων χώρου μέσα στη Γη ενώ το εστιακό βάθος μπαίνει ως παράμετρος στους πίνακες και στις καμπύλες χρόνων διαδρομής.

Δ μοίρες	t mm:ss	3.5	00:53.4	8.0	01:56.7	15.0	03:31.2
0.0	00:05.4	4.0	01:00.5	8.5	02:03.7	16.0	03:44.0
0.5	00:10.5	4.5	01:07.6	9.0	02:10.6	17.0	03:56.7
1.0	00:17.7	5.0	01:14.7	9.5	02:17.5	20.0	04:32.5
1.5	00:24.8	5.5	01:21.7	10.0	02:24.4	21.0	04:42.9
2.0	00:32.0	6.0	01:28.7	11.0	02:38.1	22.0	04:52.9
2.5	00:39.1	6.5	01:35.8	12.0	02:51.6	23.0	05:02.8
3.0	00:46.3	7.0	01:42.8	13.0	03:05.0	24.0	05:12.5
		7.5	01:49.8	14.0	03:18.1	25.0	05:22.2

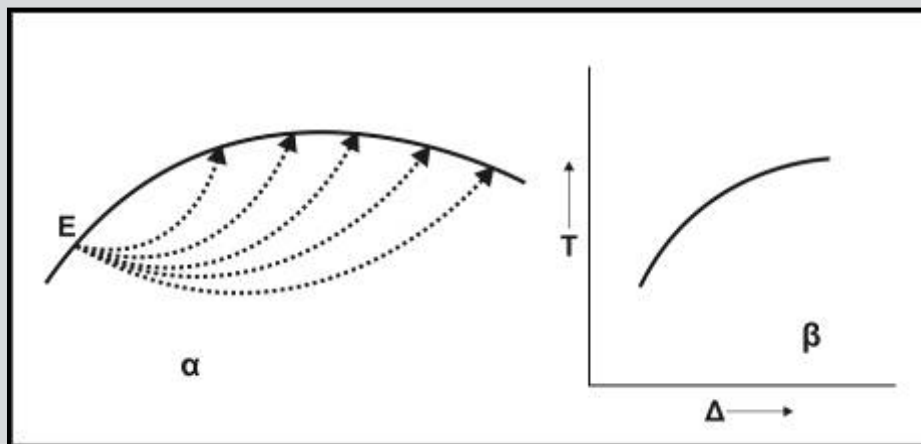
**Πίνακας χρόνων διαδρομής.**

## Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων χώρου (συνέχεια)

Οι χρόνοι διαδρομής εξαρτώνται και από το εστιακό βάθος του σεισμού. Για το λόγο αυτό, έχουν κατασκευαστεί πίνακες χρόνων διαδρομής για διάφορα εστιακά βάθη. Ένας τέτοιος πίνακας είναι ο πίνακας των **Jeffreys and Bullen** (1948). Οι πιο σύγχρονοι πίνακες χρόνων διαδρομής βασίζονται στις αναγραφές **πυρηνικών ή άλλων εκρήξεων**, γιατί οι εστίες και οι χρόνοι γένεσης των εκρήξεων είναι γνωστοί με μεγάλη ακρίβεια.

### Κανονική μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος μέσα στη Γη

Οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου μεταβάλλονται κατά κύριο λόγο με το βάθος μέσα στη Γη και πολύ λιγότερο οριζόντια. Όταν η μεταβολή της ταχύτητας,  $u$ , με το βάθος,  $h$ , είναι συνεχής και η βαθμίδα μεταβολής αυτής ( $du/dh$ ) είναι μικρή, λέμε ότι έχουμε **κανονική μεταβολή της ταχύτητας** με το βάθος. Στο μεγαλύτερο μέρος του εσωτερικού της Γης η μεταβολή της ταχύτητας μπορεί να θεωρηθεί κανονική. Το σχήμα κάτω παριστάνει σεισμικές ακτίνες ( $\alpha$ ) και την καμπύλη χρόνων διαδρομής ( $\beta$ ) στην περίπτωση κανονικής μεταβολής της ταχύτητας με το βάθος. Φαίνεται ότι ο χρόνος διαδρομής,  $T$ , είναι μονοσήμαντη συνάρτηση της επικεντρικής απόστασης.



Σεισμικές ακτίνες ( $\alpha$ ) και καμπύλη χρόνων διαδρομής ( $\beta$ ) για κανονική μεταβολή της ταχύτητας με το βάθος.

## Κανονική μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος μέσα στη Γη

Κάθε σεισμική ακτίνα χαρακτηρίζεται από την παράμετρο  $p$  η οποία δίνεται από τη σχέση

$$p = r \sin i / v$$

όπου  $r$  είναι η απόσταση από το κέντρο της Γης,  $i$  η γωνία πρόσπτωσης και  $v$  η ταχύτητα. Η τιμή της παραμέτρου αυτής είναι σταθερή για όλο το μήκος της διαδρομής της ακτίνας και ουσιαστικά είναι ο νόμος του Snell για σφαιρική Γη.

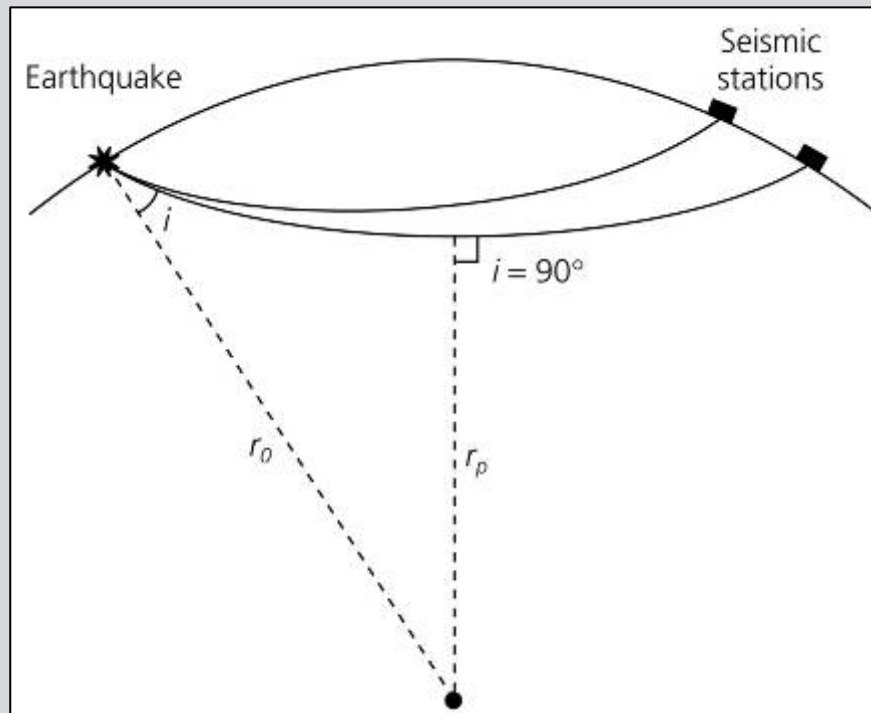
Στην επιφάνεια της Γης:

$$p = \frac{r_0 \sin i}{v_0}$$

Στο βαθύτερο σημείο της διαδρομής:

$$r = r_p$$

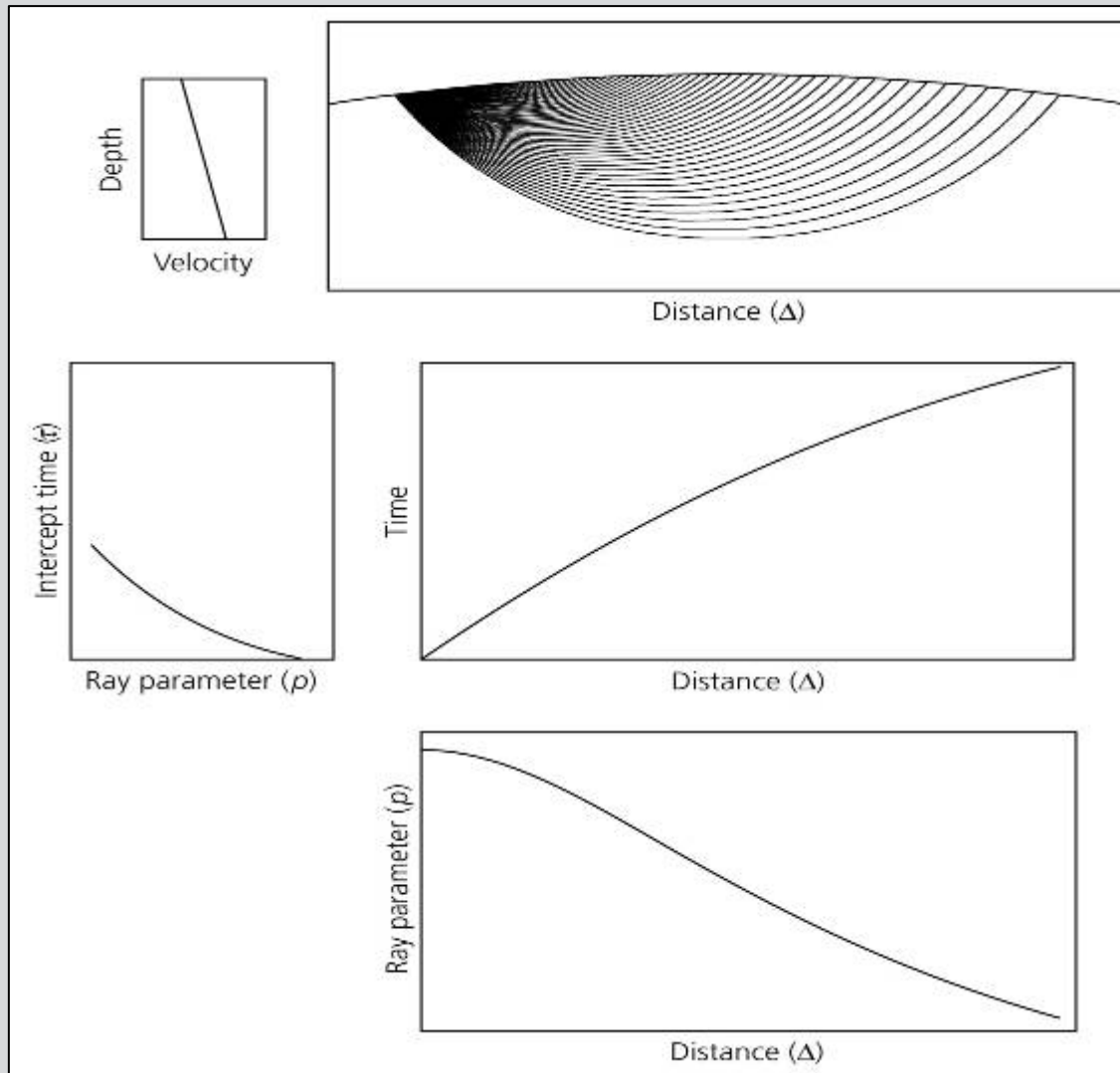
$$p = \frac{r_p}{v_p}$$



Γεωμετρία σεισμικών ακτίνων σε σφαιρική Γη με σταθερή αύξηση (κανονική μεταβολή) της ταχύτητας με το βάθος.

Η παράμετρος μιας σεισμικής ακτίνας σε επικεντρική απόσταση  $\Delta$ , ισούται με την κλίση  $dT/d\Delta$  της καμπύλης χρόνων διαδρομής στην απόσταση  $\Delta$ .

## Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων χώρου (συνέχεια)

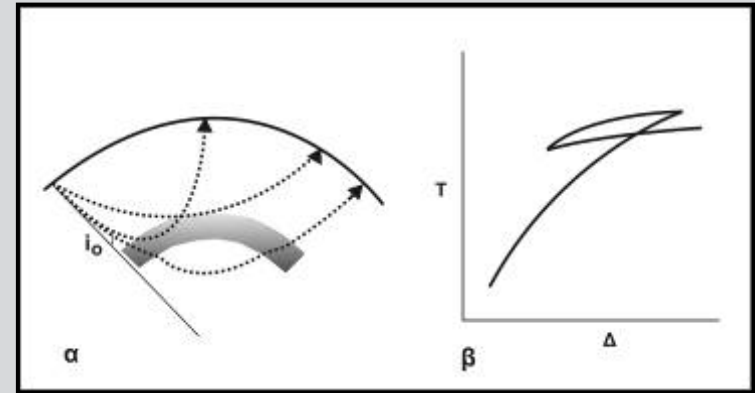


Περίπτωση κανονικής μεταβολής της ταχύτητας με το βάθος (Stein and Wysession 2003).



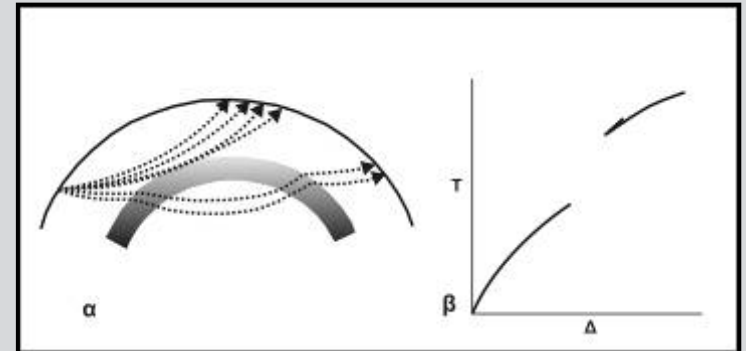
## Μη Κανονική μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος μέσα στη Γη

Σε περίπτωση **στρώματος μεγάλης ταχύτητας** στο εσωτερικό της Γης, τότε οι σεισμικές ακτίνες, που περνάν από την περιοχή αυτή, καμπυλώνονται ισχυρά, με συνέπεια να φθάνουν αυτές σε αποστάσεις μικρότερες από εκείνες στις οποίες φθάνουν άλλες ακτίνες, που αναχωρούν από την εστία με μεγαλύτερες γωνίες ως προς την κατακόρυφο, αλλά βρίσκονται ολόκληρες πάνω από την περιοχή που προκαλεί την ανωμαλία (σχήμα α). Ο χρόνος διαδρομής,  $T$ , δεν είναι μονοσήμαντη συνάρτηση της επικεντρικής απόστασης,  $\Delta$  (σχήμα β), δηλαδή, υπάρχουν κύματα του ίδιου είδους (π.χ. P κύματα) που αναχωρούν συγχρόνως από την εστία και φθάνουν σε διαφορετικούς χρόνους σε ορισμένο σταθμό, επειδή ακολούθησαν διαφορετικούς δρόμους.



Επίδραση στρώματος μεγάλης ταχύτητας στις σεισμικές ακτίνες (α) και αντίστοιχες καμπύλες χρόνων διαδρομής (β).

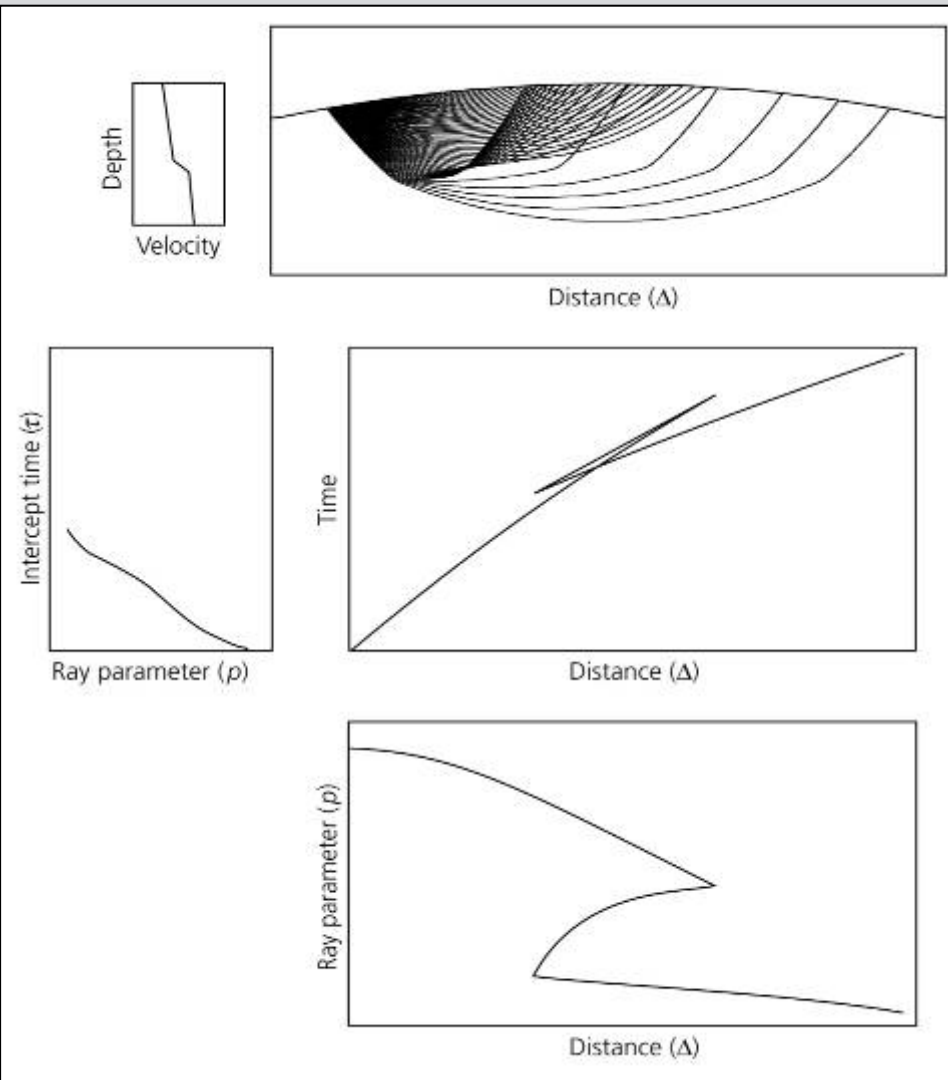
Υπάρχει και η περίπτωση **στρώματος χαμηλής ταχύτητας** μέσα στη Γη, ενώ πάνω και κάτω από το στρώμα αυτό η ταχύτητα μεταβάλλεται κανονικά (π.χ. σε ορισμένα βάρη στο μανδύα, στον εξωτερικό πυρήνα και ίσως και στο φλοιό, καθώς και στο όριο μεταξύ μανδύα και πυρήνα). Το σχήμα (α) παριστάνει τις σεισμικές ακτίνες ενώ το σχήμα (β) δείχνει την καμπύλη χρόνων διαδρομής. Φαίνεται ότι υπάρχει ασυνέχεια στην καμπύλη  $T=f(\Delta)$  και συνεπώς υπάρχει περιοχή όπου δεν αναδύονται σεισμικές ακτίνες, η οποία ονομάζεται **σκιερή ζώνη**.



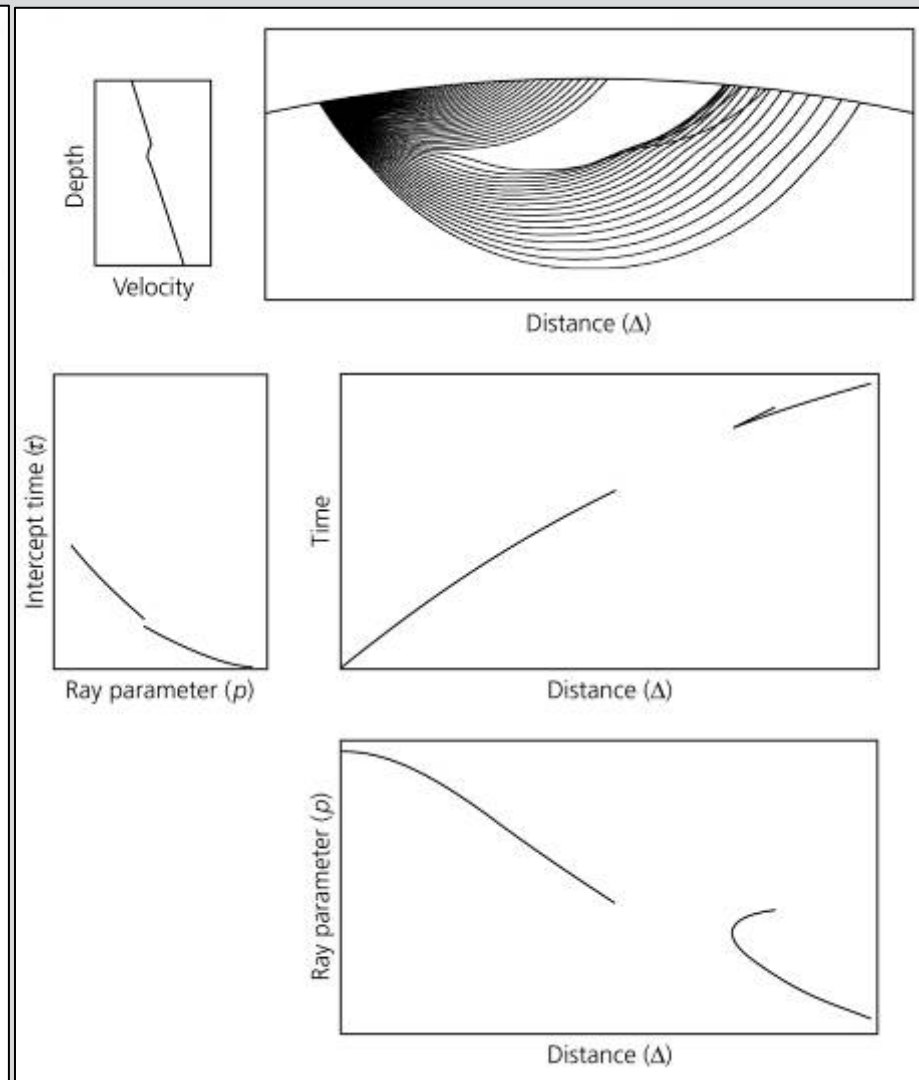
Επίδραση στρώματος μικρής ταχύτητας στις σεισμικές ακτίνες (α) και αντίστοιχες καμπύλες χρόνων διαδρομής (β).



## Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων χώρου (συνέχεια)

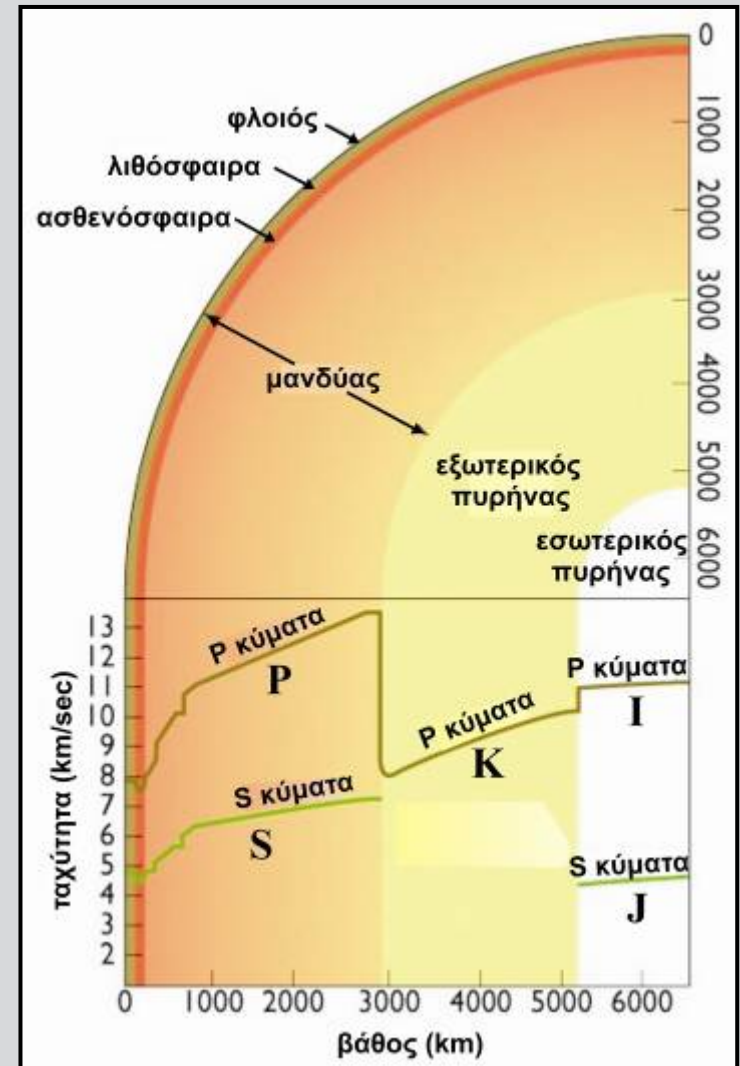
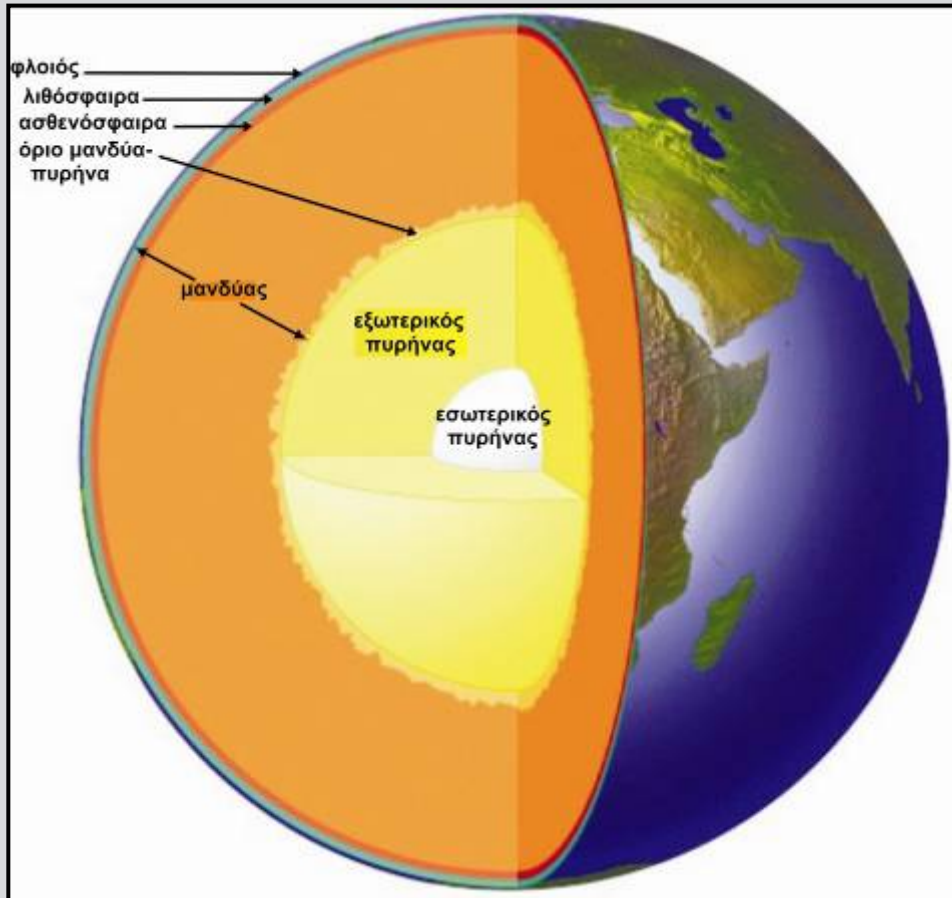


Περίπτωση στρώματος μεγάλης ταχύτητας (Stein and Wysession 2003).



Περίπτωση στρώματος μικρής ταχύτητας (Stein and Wysession 2003).

# Μεταβολή των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χώρου με το βάθος μέσα στη Γη



Η Γη αποτελείται από το φλοιό, το μανδύα και τον πυρήνα, ο οποίος χωρίζεται στον εξωτερικό και τον εσωτερικό πυρήνα.

Μεταβολή των ταχυτήτων διάδοσης των επιμήκων και εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος μέσα στη Γη.

## Μεταβολή των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χώρου με το βάθος μέσα στη Γη

- Η κατανόηση του τρόπου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα στη Γη προϋποθέτει τη γνώση της μεταβολής των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων χώρου με το βάθος.
- Η Γη χωρίζεται στο **φλοιό**, στο **μανδύα** και στον **πυρήνα**, ο οποίος χωρίζεται στον **εξωτερικό** και στον **εσωτερικό** πυρήνα.
- Με τα σύμβολα **K** και **I** παριστάνονται οι καμπύλες, που αφορούν τις ταχύτητες των επιμήκων κυμάτων στον εξωτερικό και τον εσωτερικό πυρήνα, αντίστοιχα, ενώ με το σύμβολο **J** παριστάνεται η καμπύλη που αφορά την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων στον εσωτερικό πυρήνα.
- Οι **ταχύτητες** των κυμάτων χώρου στο **μεγαλύτερο μέρος της Γης αυξάνονται** με το βάθος **συνεχώς** αλλ' όχι έντονα, δηλαδή, **μεταβάλλονται κανονικά**.
- Υπάρχουν **περιοχές του εσωτερικού της Γης** όπου η ταχύτητα δε μεταβάλλεται κανονικά με το βάθος. Υπάρχουν, μάλιστα, ορισμένα βάθη όπου **η ταχύτητα μεταβάλλεται απότομα**. Στα βάθη αυτά υπάρχουν **ασυνέχειες των ταχυτήτων**. Δύο από τις ασυνέχειες αυτές είναι οι σπουδαιότερες και γι' αυτό ονομάζονται **ασυνέχειες πρώτης τάξης**. Αυτές αποτελούν επιφάνειες που χωρίζουν τη Γη σε τρία συγκεντρικά στρώματα. Τα στρώματα αυτά είναι ο **φλοιός**, ο **μανδύας** και ο **πυρήνας**.
- Η ασυνέχεια που χωρίζει το **φλοιό** από το **μανδύα** λέγεται **ασυνέχεια Mohorovicic** ενώ η ασυνέχεια που χωρίζει το **μανδύα** από τον **πυρήνα** λέγεται **ασυνέχεια Gutenberg**, από τα ονόματα των επιστημόνων που τις ανακάλυψαν. Μια από τις **ασυνέχειες δεύτερης τάξης** είναι αυτή που βρίσκεται σε βάθος περίπου **670 km (ασυνέχεια Lehmann)** και σχεδόν συμπίπτει με το μεγαλύτερο βάθος στο οποίο γίνονται σεισμοί.

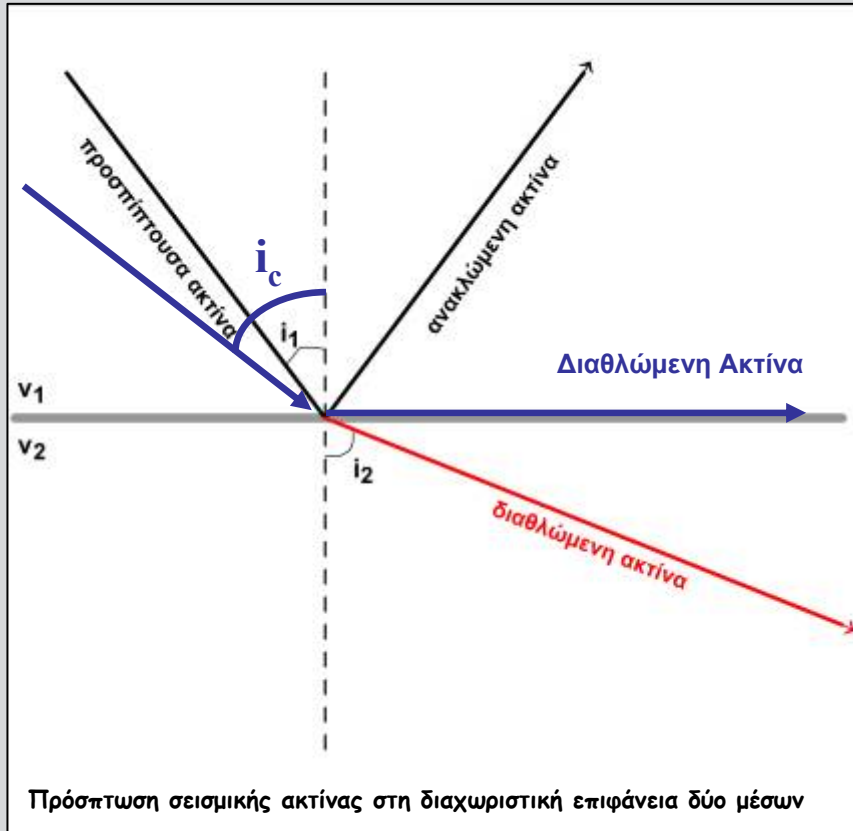
## Διάδοση των σεισμικών κυμάτων χώρου στο εσωτερικό της Γης

- Τα παραγόμενα στην εστία ενός σεισμού επιμήκη και εγκάρσια κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και φθάνουν στην επιφάνεια αυτής, όπου μπορούν να γραφούν από τα σεισμικά όργανα.
- Το γεγονός ότι η Γη έχει πεπερασμένες διαστάσεις και **δεν είναι ομογενής** έχει ως συνέπεια τη **διάθλαση, ανάκλαση, περίθλαση, σκέδαση, απόσβεση**, κλπ. των διαδιδόμενων στο εσωτερικό της σεισμικών κυμάτων. Για το λόγο αυτό, πολλές κατηγορίες σεισμικών κυμάτων φθάνουν στην επιφάνεια της Γης και γράφονται από τους σειсмоγράφους.
- Οι κατηγορίες αυτές, που συνήθως λέγονται **φάσεις** των σεισμικών κυμάτων, διαφέρουν ως προς τη φαινόμενη ταχύτητα διάδοσης, το πλάτος, την περίοδο και γενικά ως προς τη μορφή τους. Η μελέτη των ιδιοτήτων αυτών οδηγεί στην εξακρίβωση των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης και συμβάλλουν στη γένεση των φάσεων αυτών.
- Η **φαινόμενη ταχύτητα,  $V$** , διάδοσης ενός κύματος σε ορισμένο σημείο της επιφάνειας της Γης είναι ίση με το **αντίστροφο** της κλίσης της καμπύλης χρόνων διαδρομής,  **$d\Delta/dT$** , για απόσταση ίση με την επικεντρική απόσταση,  $\Delta$ , του σεισμού από το σημείο. Δηλαδή,

$$V = \frac{d\Delta}{dT}$$

- Η **φαινόμενη ταχύτητα είναι ίση με την πραγματική ταχύτητα στο κατώτερο σημείο της ακτίνας**, δηλαδή, στο **κατώτερο** σημείο του δρόμου τον οποίο διατρέχει το κύμα από την εστία μέχρι το σημείο παρατήρησης.

## Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό



Κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης ισχύουν οι αρχές του Fermat και του Huygens καθώς και ο νόμος του Snell όπως φαίνεται στο σχήμα.

### Αρχή του Fermat

Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε υλικό μέσο, ακολουθεί τη διαδρομή του ελάχιστου χρόνου

### Αρχή του Huygens

Κάθε υλικό σημείο που ταλαντώνεται κατά τη διέλευση κύματος, γίνεται με τη σειρά του πηγή δευτερογενούς ακτινοβολίας

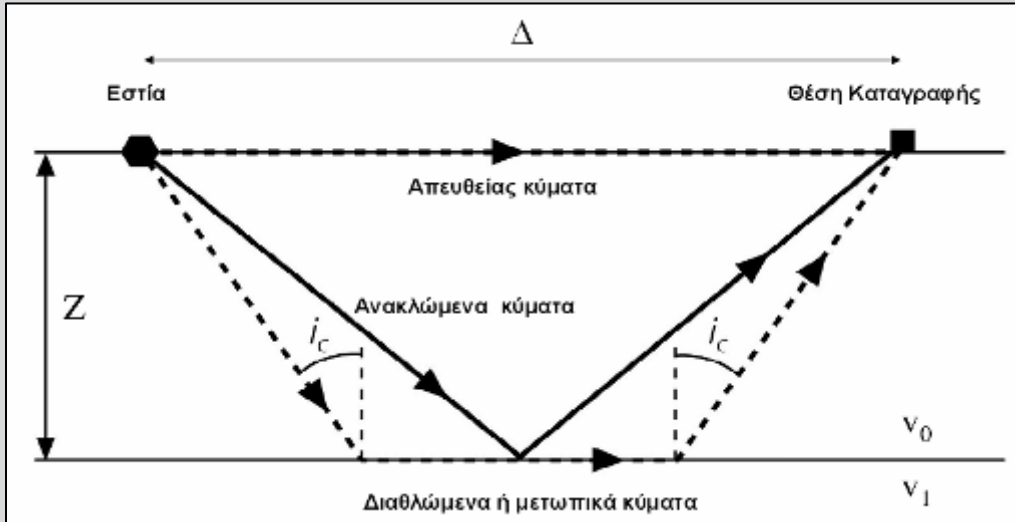
### Νόμος του Snell

$$\frac{\eta\mu i_1}{\eta\mu i_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Όταν όμως η προσπίπτουσα ακτίνα αποκτά τιμή  $i_1 = i_c$ , τέτοια που η  $i_2$  να γίνει ίση με  $90^\circ$ , δηλαδή θα ισχύει  $\eta\mu i_c = v_1/v_2$ , τότε:

η διαθλώμενη ακτίνα ακολουθεί τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων και τα κύματα αυτά ονομάζονται μετωπικά κύματα (head waves). Η γωνία  $i_c$  καλείται ορική γωνία.

## Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό (συνέχεια)



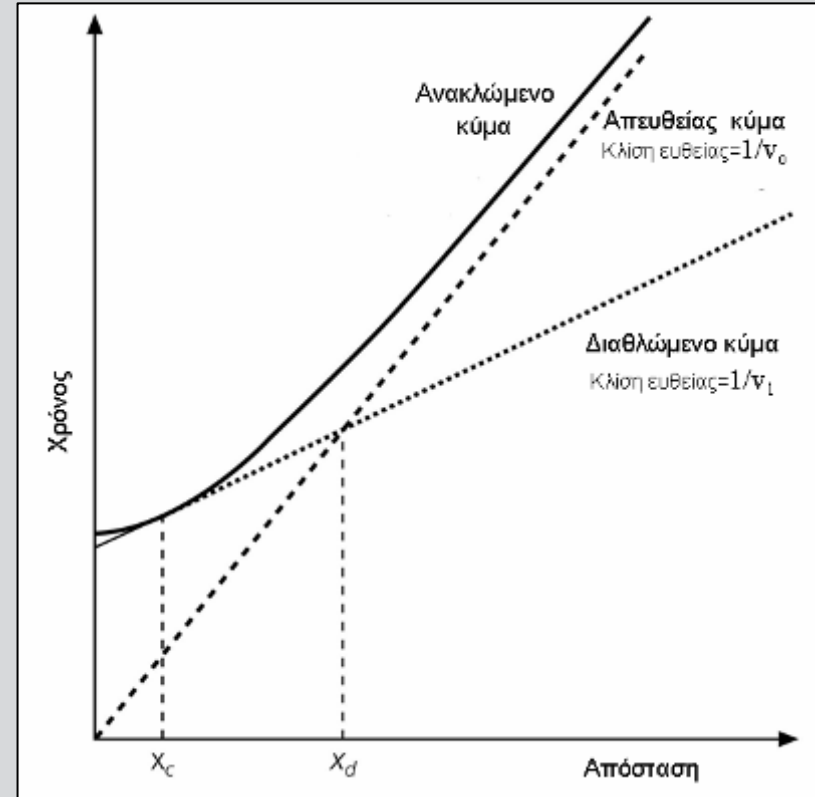
Διάδοση κυμάτων σε ένα στρώμα με ταχύτητα  $v_0$  το οποίο βρίσκεται πάνω από ημιχώρο με ταχύτητα  $v_1 > v_0$ .

Οι εξισώσεις των χρόνων διαδρομής σε συνάρτηση με την απόσταση  $\Delta$  είναι:

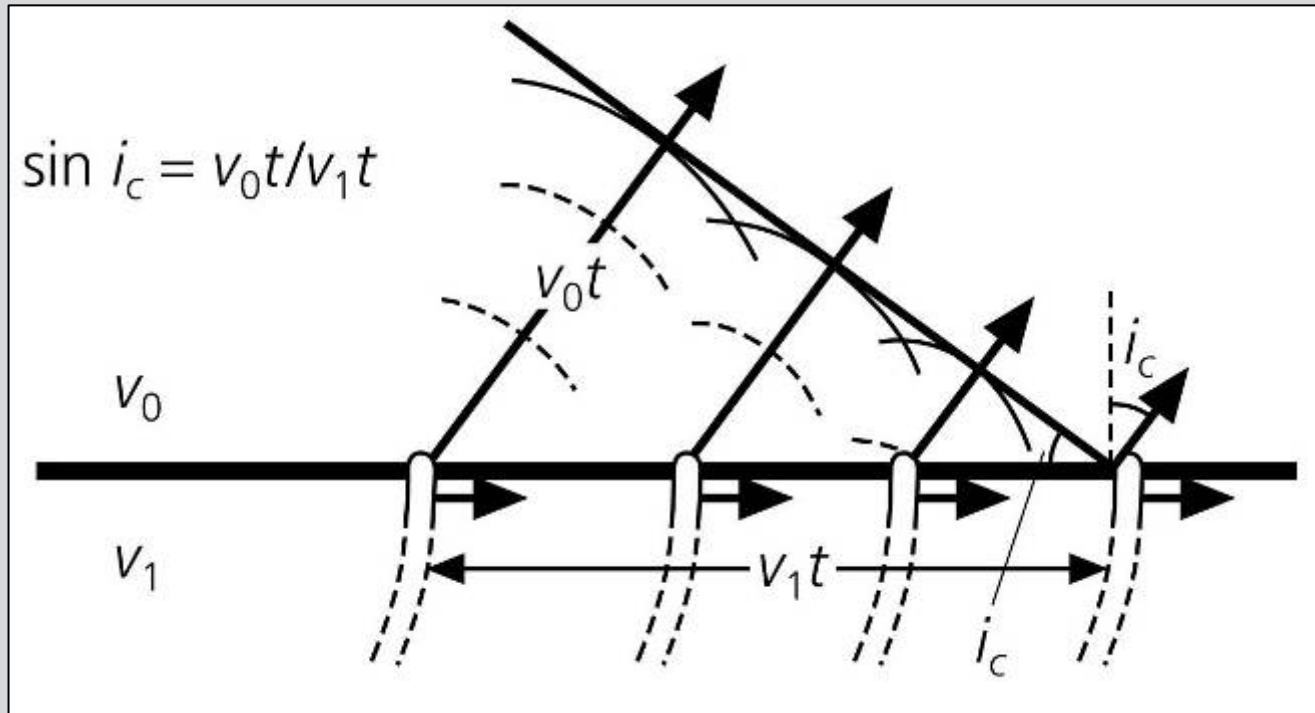
Απευθείας κύματα: 
$$T_1 = \frac{\Delta}{v_0}$$

Διαθλώμενα κύματα: 
$$T_2 = \frac{\Delta}{v_1} + 2z \frac{\sqrt{v_1^2 - v_0^2}}{v_0 v_1}$$

Ανακλώμενα κύματα: 
$$T_3 = \frac{\sqrt{\Delta^2 + 4z^2}}{v_0}$$



## Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό (συνέχεια)

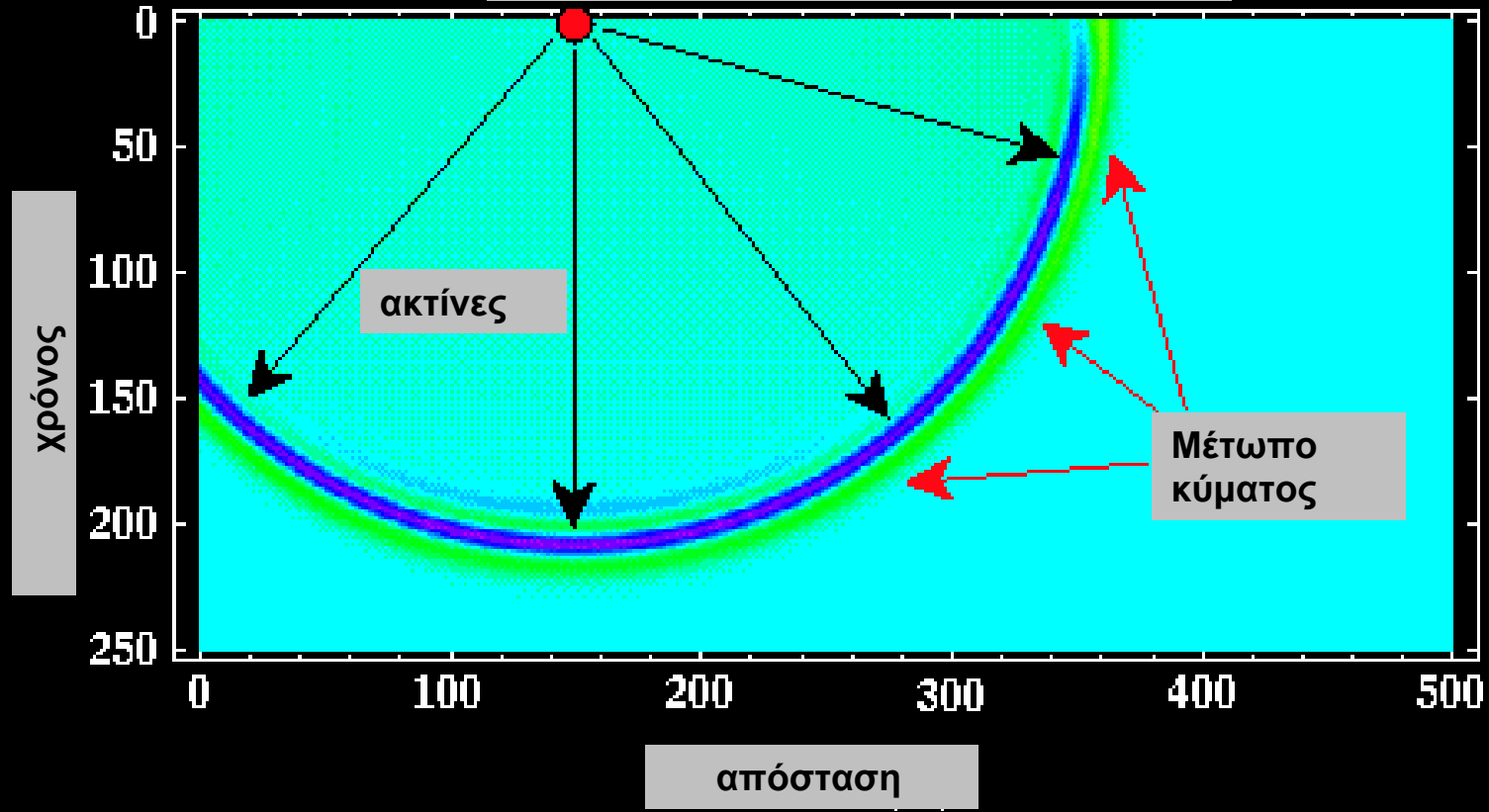


Γένεση μετωπικών κυμάτων στο πάνω στρώμα που διαδίδονται με ταχύτητα  $v_0$ , τα οποία οφείλονται στη διάδοση των διαθλώμενων κυμάτων με ταχύτητα  $v_1$  (διάδοση στο κάτω στρώμα) κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας. Επομένως το μετωπικό κύμα διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα από το διαθλώμενο στο οποίο οφείλεται. Το μετωπικό κύμα αντιστοιχεί στη διαδρομή του ελαχίστου χρόνου. Με βάση την αρχή του Huygens μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το διαθλώμενο κύμα το οποίο διαδίδεται οριζόντια κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας με ταχύτητα αυτήν του κάτω στρώματος δημιουργεί σφαιρικά κύματα τα οποία διαδίδονται προς τα πάνω (στο πάνω στρώμα). Η συμβολή των κυμάτων αυτών δημιουργεί τα επίπεδα κύματα τα οποία φεύγουν από τη διαχωριστική επιφάνεια με την κρίσιμη γωνία  $i_c$ . (Griffiths and King 1981, Stein and Wysession, 2003)

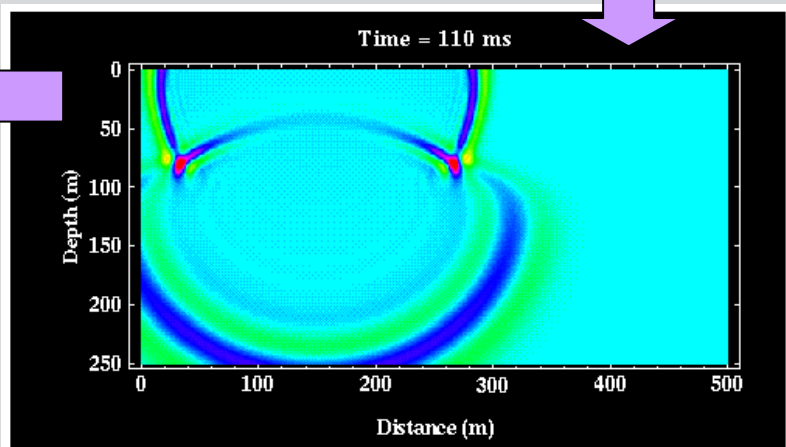
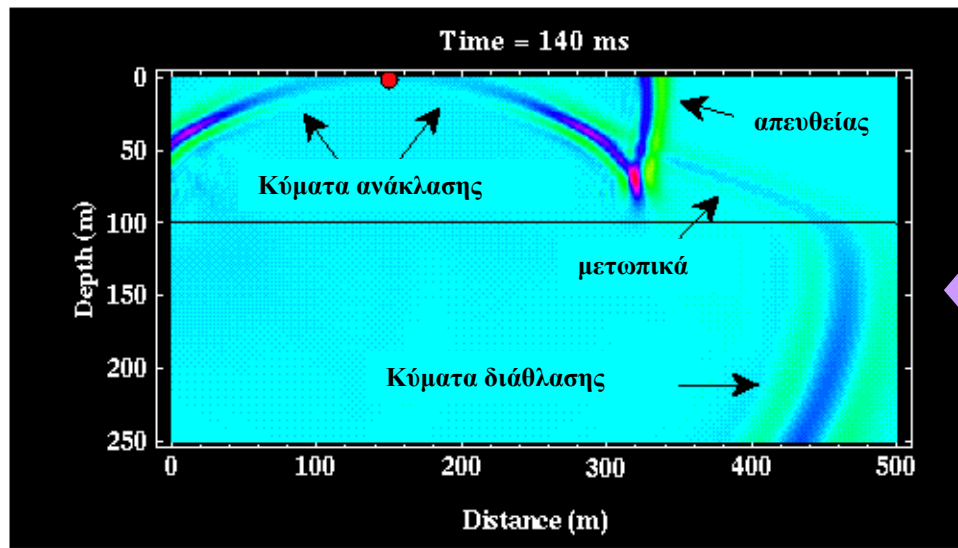
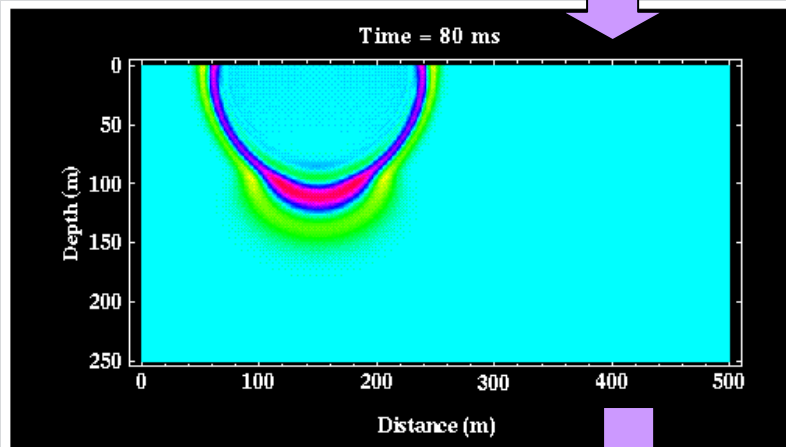
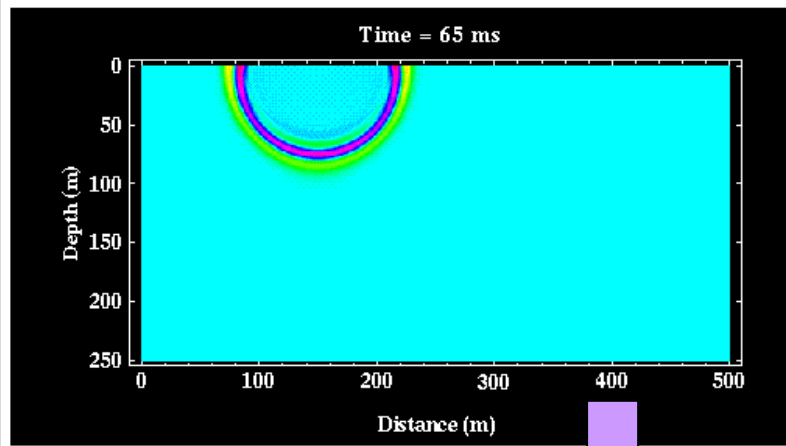
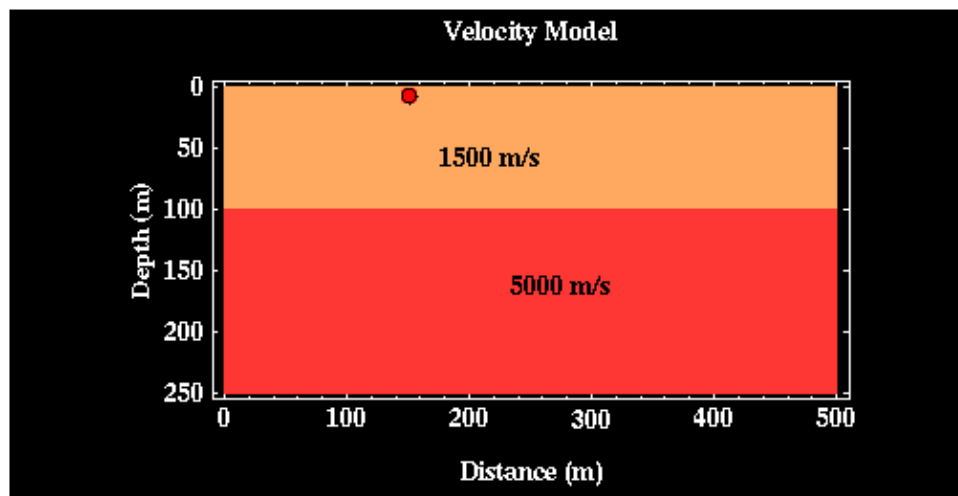


Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό (συνέχεια)

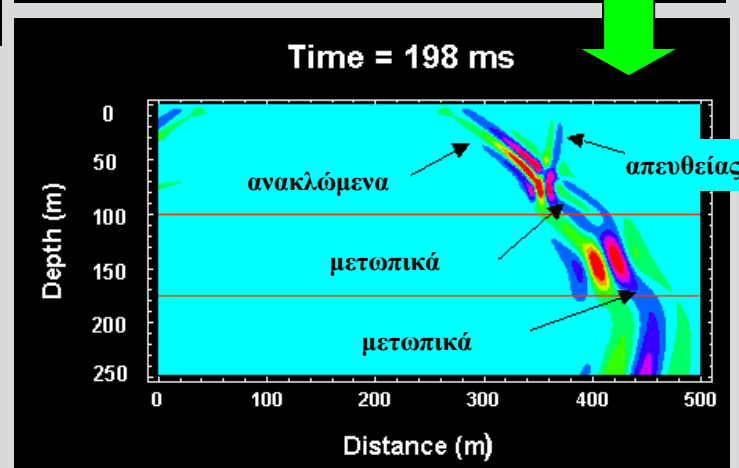
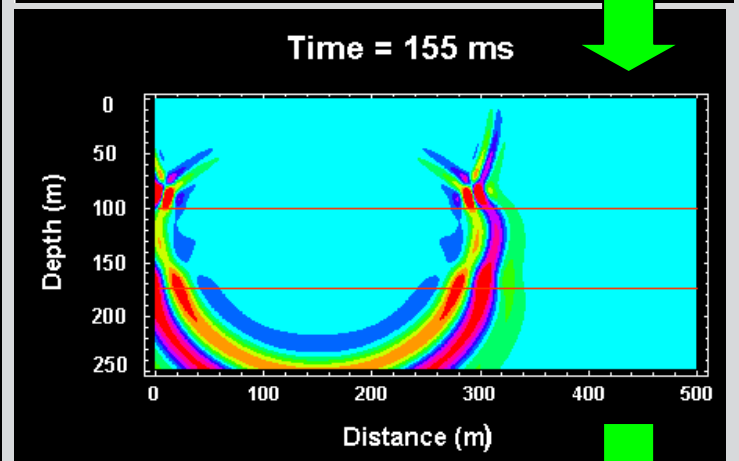
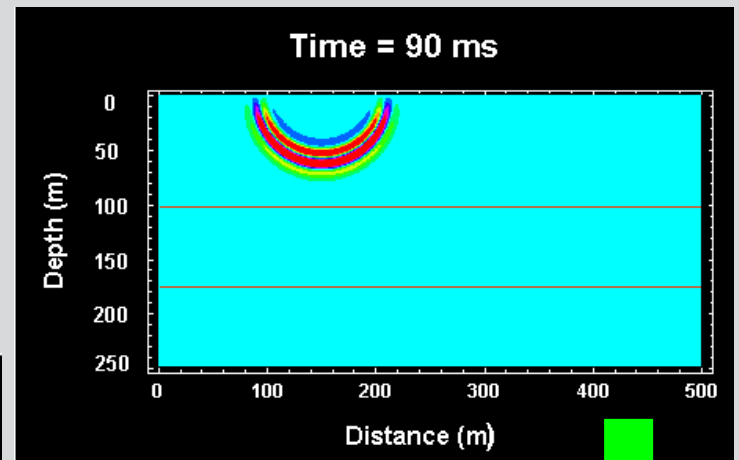
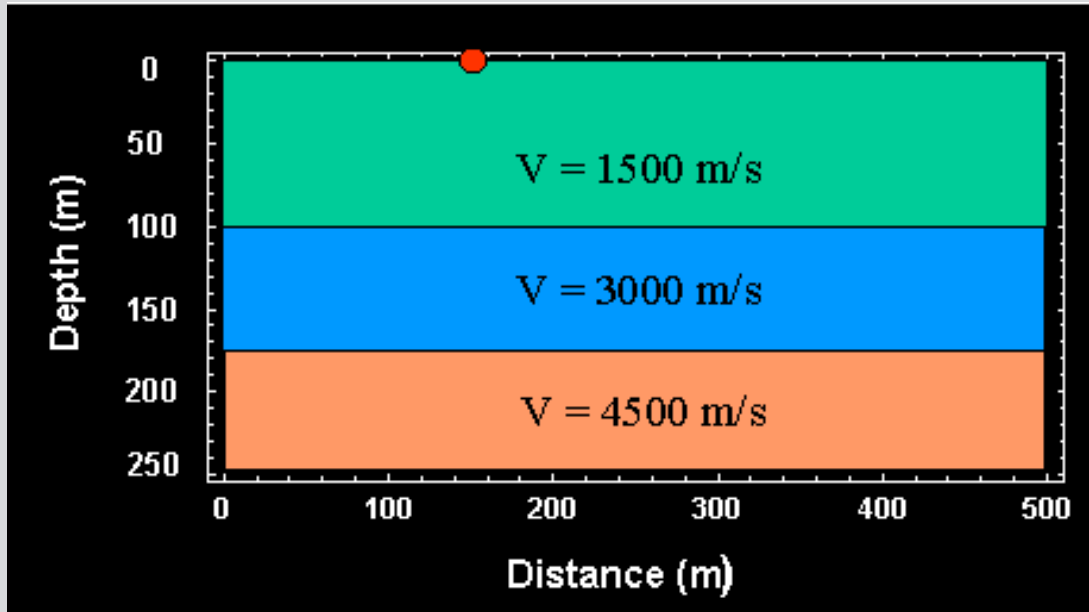
Μέτωπα κύματος και σεισμικές ακτίνες



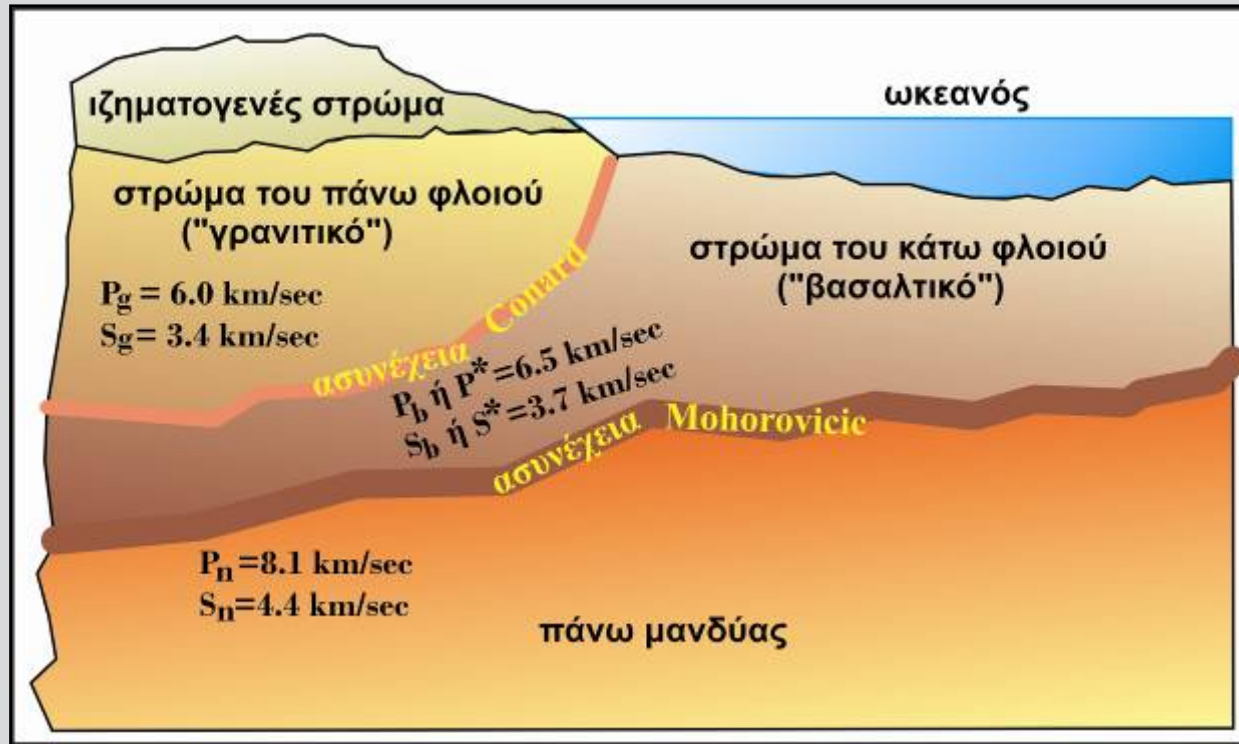
# Στρώμα πάνω από ημιχώρο



# Δύο στρώματα με ημιχώρο

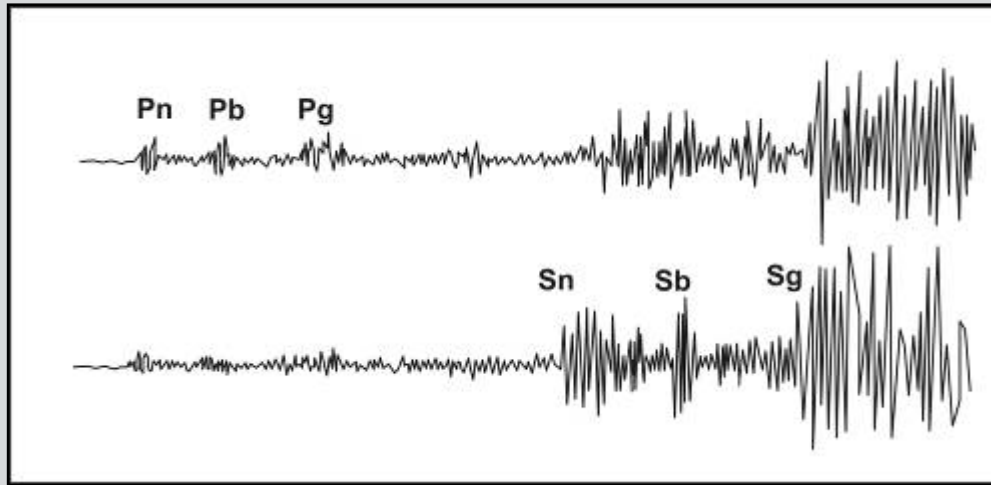


## Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό (συνέχεια)



- Ο ηπειρωτικός φλοιός αποτελείται από τρία, σχεδόν οριζόντια, στρώματα.
- Πάχος του φλοιού κάτω από τις ηπείρους: ~35 km (ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή μεταξύ 20 και 70 km).
- Πάχος του φλοιού κάτω από τους ωκεανούς: ~7 km.
- Το ανώτερο απ' αυτά είναι ένα λεπτό στρώμα που αποτελείται από ιζηματογενή πετρώματα, και λέγεται **ιζηματογενές στρώμα**.
- Κάτω απ' αυτό υπάρχει το **στρώμα του πάνω φλοιού** (που παλαιότερα ονομαζόταν «γρανιτικό στρώμα»).
- Κάτω από το στρώμα αυτό υπάρχει το **στρώμα του κάτω φλοιού** (που παλαιότερα ονομαζόταν «βασαλτικό στρώμα»). Η επιφάνεια που χωρίζει τα δύο αυτά στρώματα λέγεται **ασυνέχεια Conard**. Ο ωκεάνιος φλοιός έχει μόνο ένα στρώμα (βασαλτικό) πάνω στο οποίο επικάθονται τα ιζήματα.
- Το βασαλτικό στρώμα χωρίζεται από τον **πάνω μανδύα** από την **ασυνέχεια Mohorovicic**.

## Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό (συνέχεια)



Σεισμογράμματα που γράφτηκαν σε απόσταση 500 km από το επίκεντρο. Δείχνονται οι αναγραφές των Pn, Pb, Pg καθώς και των Sn, Sb, Sg κυμάτων (Robel, 1959).

Από αναγραφές διαφόρων φάσεων **τοπικών και γειτονικών σεισμών** ( Δ μέχρι 1000 km περίπου), έγινε δυνατός ο καθορισμός των βασικών ιδιοτήτων του φλοιού της Γης.

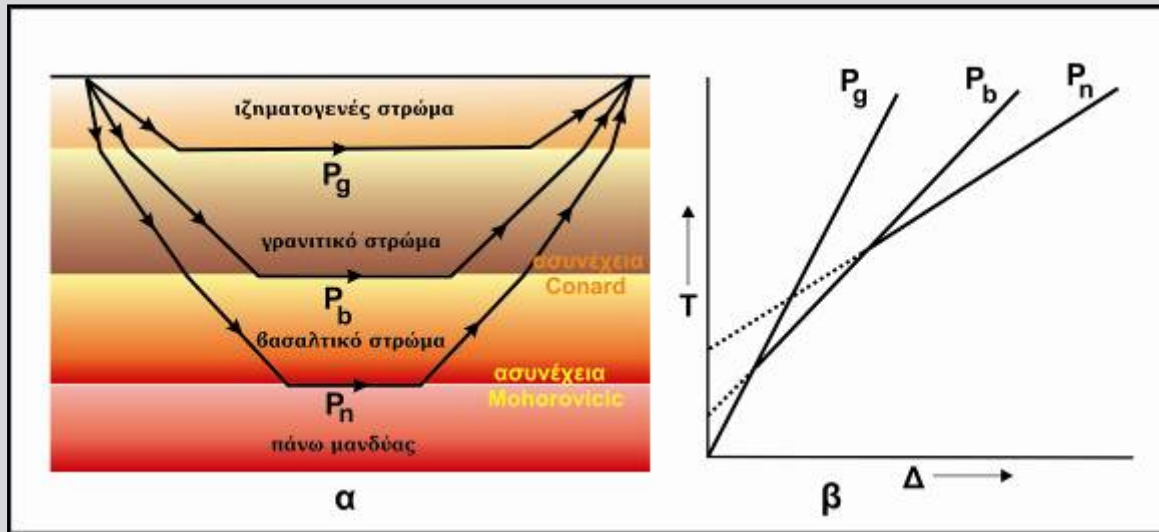
- Η γνώση της ύπαρξης του «**γρανιτικού**» στρώματος οφείλεται στην αναγραφή από τα σεισμόμετρα μιας φάσης των **επιμήκων κυμάτων**, που συμβολίζεται με το **Pg**. Η ταχύτητα των κυμάτων αυτών είναι της τάξης των **6 km/sec**. Παράλληλα παρατηρήθηκε και η αντίστοιχη φάση των **εγκαρσίων κυμάτων**, που παριστάνεται με το **Sg** και έχει ταχύτητα ίση με **3.4 km/sec**, περίπου.

- Η ύπαρξη του «**βασαλτικού**» στρώματος συμπεραίνεται από την αναγραφή μιας φάσης των **επιμήκων κυμάτων**, που παριστάνεται με το **Pb** (ή **P\***) και της αντίστοιχης φάσης των **εγκαρσίων κυμάτων**, που παριστάνεται με το **Sb** (ή **S\***), με **φαινόμενες ταχύτητες** περίπου **6.5 km/sec** και **3.7 km/sec**, αντίστοιχα.

- Η ανακάλυψη της **ασυνέχειας Mohorovicic** οφείλεται στην αναγραφή φάσης των **επιμήκων κυμάτων** που παριστάνεται με το **Pn** και έχει **φαινόμενη ταχύτητα** ίση με **8.1 km/sec**, περίπου, ενώ η αντίστοιχη φάση των **εγκαρσίων κυμάτων** έχει συνήθως ταχύτητα **4.4 km/sec** και παριστάνεται με το **Sn**.

Από τις φάσεις των κυμάτων χώρου που φθάνουν σε ένα σεισμολογικό σταθμό, ορισμένες οφείλονται σε **κύματα διάθλασης**, άλλες σε **διαυλικά κύματα** και άλλες σε **κύματα ανάκλασης**.

## Κύματα διάθλασης



Διάδοση των επιμήκων κυμάτων διάθλασης μέσα στο φλοιό (α) και καμπύλες χρόνων διαδρομής αυτών (β).

Τα κύματα  $P_g$  παρατηρούνται στους τοπικούς και γειτονικούς ηπειρωτικούς σεισμούς που έχουν τις εστίες τους μέσα στο **γρανιτικό** ή μέσα στο **ιζηματογενές** στρώμα.

⊗ **Αν η εστία βρίσκεται στο γρανιτικό στρώμα**, τότε το κύμα  $P_g$  διαδίδεται ευθύγραμμα μέσα σε αυτό, μετά **διαθλάται** στην **ορική επιφάνεια** που βρίσκεται μεταξύ του γρανιτικού και του ιζηματογενούς στρώματος και διαδιδόμενο μέσα στο ιζηματογενές στρώμα φθάνει στο σταθμό.

⊗ **Αν η εστία βρίσκεται στο ιζηματογενές στρώμα** (όπως στο σχήμα), τότε το κύμα  $P_g$  αναχωρεί από την εστία που βρίσκεται μέσα σε αυτό το στρώμα, **προσπίπτει** στη **διαχωριστική επιφάνεια** που βρίσκεται μεταξύ του στρώματος αυτού και του γρανιτικού στρώματος υπό γωνία ίση με την ορική και **διαθλάται**. Στη συνέχεια αυτό **διαδίδεται κατά μήκος της τομής της διαχωριστικής επιφάνειας και του κατακορύφου επιπέδου**, που περνάει από την εστία και το σταθμό, με την ταχύτητα που έχει αυτό στο **κάτω στρώμα** (γρανιτικό), δηλαδή περίπου με 6.0 km/sec και φθάνει από το συμμετρικό δρόμο στην επιφάνεια της Γης, αφού υποστεί δεύτερη διάθλαση στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο στρωμάτων.

- Τα **Pb** κύματα προσπίπτουν στην **ασυνέχεια Conard** υπό την **ορική γωνία** και **διαδίδονται κατά μήκος της τομής της επιφάνειας αυτής και του κατακορύφου επιπέδου**, με την ταχύτητά τους στο «**βασαλτικό**» στρώμα για να φθάσουν στο σταθμό από το συμμετρικό δρόμο.
- Τα **Pn** κύματα προσπίπτουν στην **ασυνέχεια Mohorovicic** υπό την **ορική γωνία**, **διαδίδονται κατά μήκος της τομής της επιφάνειας αυτής με το κατακόρυφο επίπεδο**, με την ταχύτητά τους αμέσως κάτω από το φλοιό και φθάνουν στο σταθμό από το συμμετρικό δρόμο.
- Αντίστοιχες πορείες ακολουθούν και τα κύματα **Sg**, **Sb** και **Sn**.

Κάθε **ορική γωνία** (μεταξύ της σεισμικής ακτίνας και της κατακορύφου στο σημείο πρόσπτωσης) ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta\mu i_c = \frac{u}{V}$$

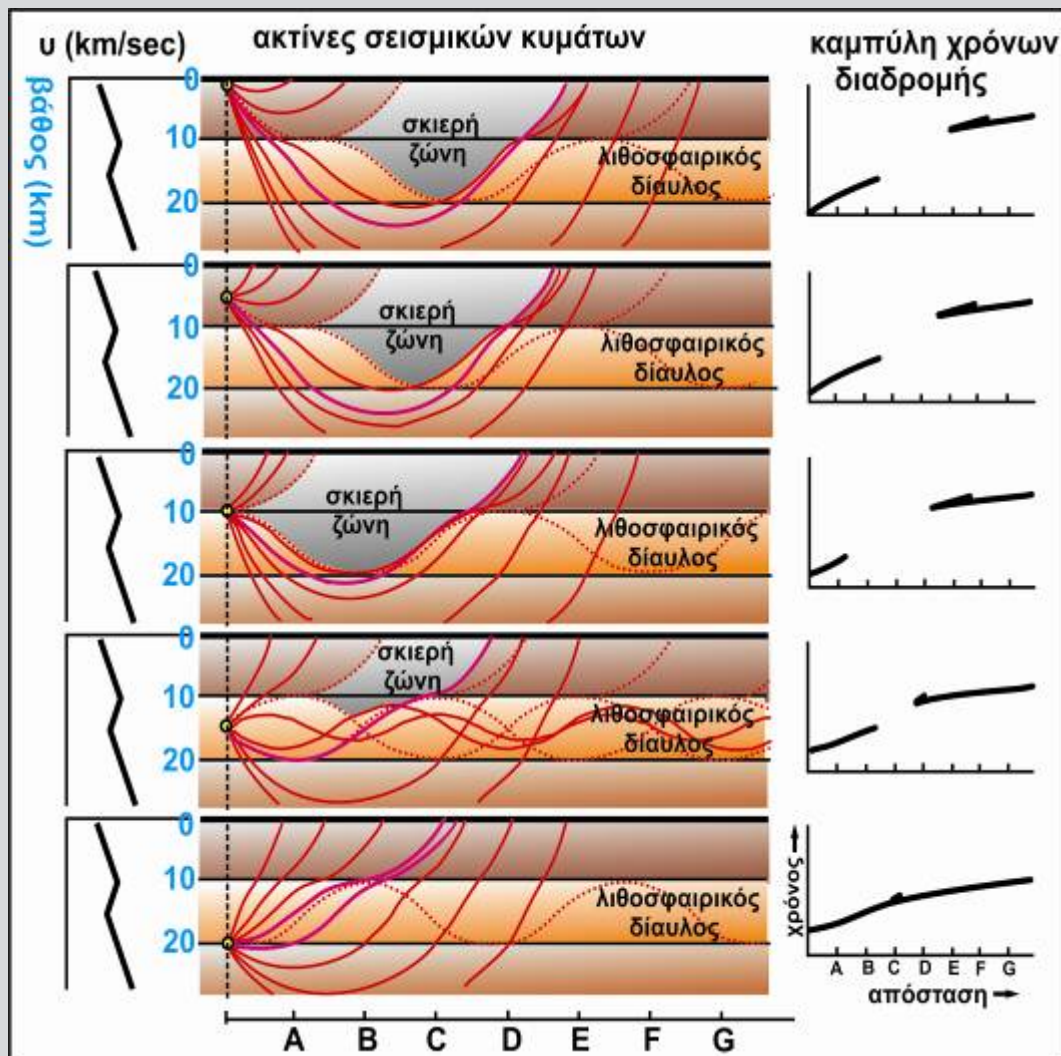
όπου **u** και **V** είναι η **ταχύτητα** του κύματος αμέσως **πάνω** και αμέσως **κάτω** από τη διαχωριστική επιφάνεια, αντίστοιχα.

● Επειδή η φαινόμενη ταχύτητα ενός κύματος είναι ίση με την ταχύτητα αυτού στο κατώτερο σημείο της σεισμικής ακτίνας του, **οι φαινόμενες ταχύτητες** που αναφέρθηκαν παραπάνω, **οι οποίες ισούνται με τα αντίστροφα των κλίσεων των καμπύλων του προηγούμενου σχήματος, είναι οι πραγματικές ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων** στο «γρανιτικό» και «βασαλτικό» στρώμα και στο μέρος του μανδύα που βρίσκεται αμέσως κάτω από το φλοιό, αντίστοιχα.

Για **επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες των 130 km** περίπου, **πρώτα** φθάνουν τα **Pg** κύματα και ακολουθούν τα **Pn** κύματα τα οποία έχουν μικρότερα πλάτη ενώ **για αρκετά μεγαλύτερες αποστάσεις (>150-200 km)** **πρώτα** φθάνουν τα **Pn** κύματα. Η φάση **Pb** έχει γενικώς μικρά πλάτη και παρατηρείται καλύτερα σε αναγραφές σεισμών παρά σε αναγραφές τεχνητών εκρήξεων.



## Διαυλικά κύματα



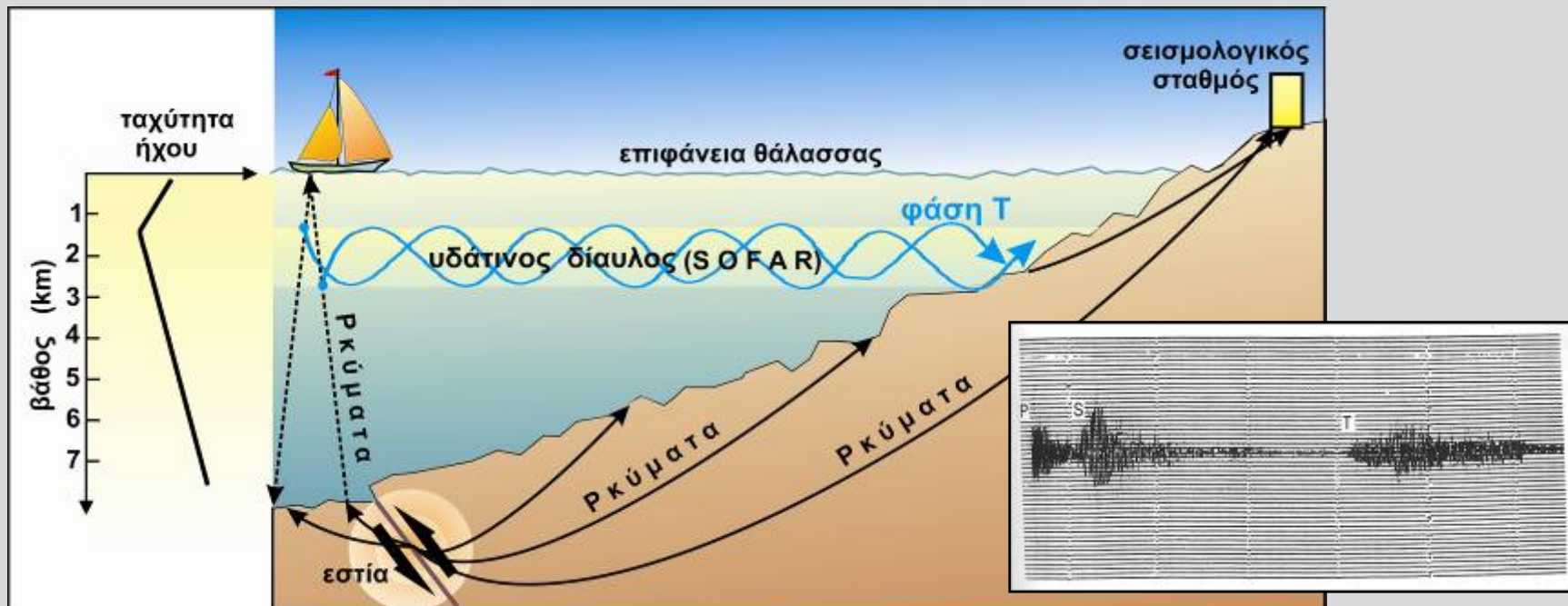
Διάδοση κυμάτων που προέρχονται από εστία σεισμού η οποία βρίσκεται σε διάφορα βάθη, στην περίπτωση που υπάρχει λιθосφαιρικός διάυλος (κέντρο). Αριστερά φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας με το βάθος και δεξιά οι αντίστοιχες καμπύλες χρόνων διαδρομής (Gutenberg, 1955, τροποποιημένο).

Σε ορισμένες περιοχές της Γης υπάρχει στρώμα μικρής ταχύτητας, περίπου από το βάθος 10 km μέχρι το βάθος 20 km μέσα στο φλοιό, το οποίο ονομάζεται **λιθосφαιρικός διάυλος**. Μέσα στο διάυλο η **ταχύτητα των Pg κυμάτων** είναι σχετικά **μικρή** (~5.6 km/sec) σε σχέση με την ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων αμέσως πάνω και αμέσως κάτω από το διάυλο.

Λόγω της ύπαρξης του διαύλου, **σημαντικό μέρος της σεισμικής ενέργειας που μπαίνει ή γεννιέται μέσα στο διάυλο, διαδίδεται μέσα σ' αυτόν με ταχύτητα ίση με τη φαινόμενη ταχύτητα των Pg ή Sg κυμάτων, λόγω διαδοχικών ανακλάσεων** στην κάτω και πάνω επιφάνεια του διαύλου και χωρίς ισχυρή απόσβεση.

Έτσι, σε μικρές αποστάσεις ( $\Delta < 60$  km) **πρώτα φθάνουν στο σταθμό τα απ' ευθείας επιμήκη κύματα τα οποία παριστάνονται με το p**. Μετά υπάρχει **σκιερή ζώνη**, δηλαδή περιοχή όπου δεν διαδίδονται κύματα και οι καμπύλες χρόνων διαδρομής διακόπτονται για τις αντίστοιχες επικεντρικές αποστάσεις, όπως αναμένεται

Για  $\Delta$  μέχρι 130 km γράφονται πρώτα τα διαυλικά κύματα Pg, που παριστάνονται και με το Pd, ενώ σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 130 km γράφονται πρώτα τα κύματα Pn ή τα Pb.



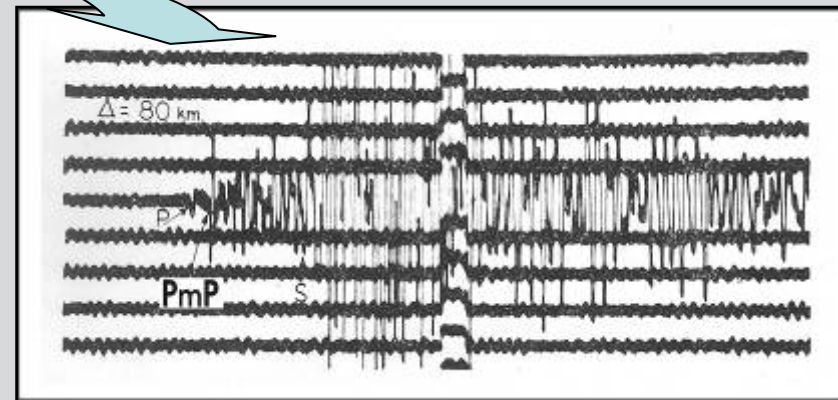
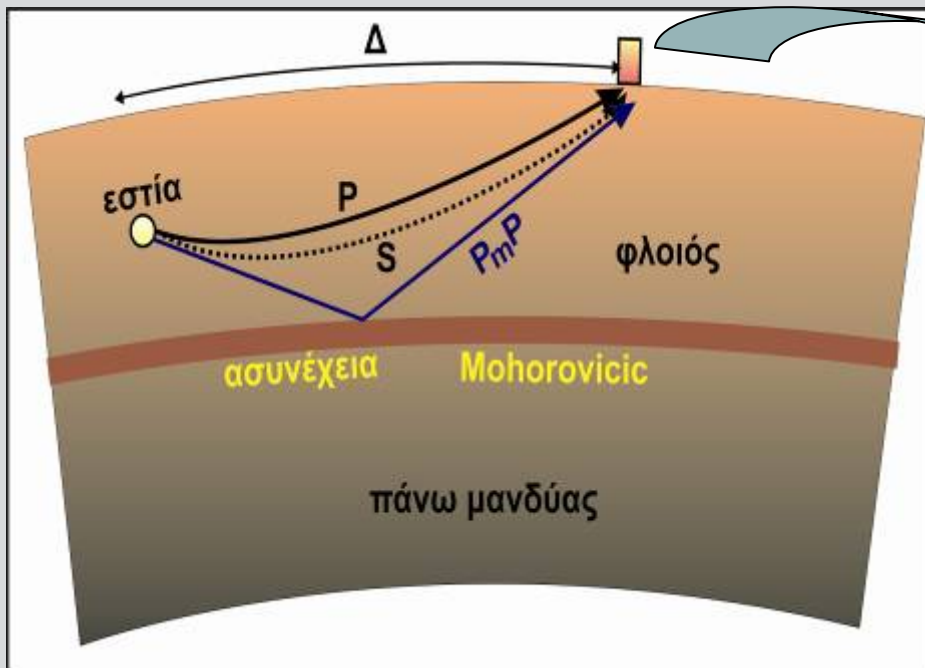
Η φάση Τ προέρχεται από επιμήκη κύματα που διαδίδονται στο θαλάσσιο νερό. Μέρος της ενέργειας των Ρ κυμάτων παγιδεύεται μέσα στο διάυλο. Δεξιά φαίνεται αναγραφή σε σειсмоγράφο βραχείας περιόδου, που είναι εγκατεστημένος σε νησί, στην οποία διακρίνεται η φάση Τ (Kulhánek, 1990).

Εκτός από τα ηπειρωτικά διαυλικά κύματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπάρχουν και **ωκεάνια διαυλικά κύματα**, που είναι γνωστά με το όνομα **φάση Τ**.

Η φάση αυτή διαδίδεται μέσα σε **υδάτινο διάυλο** (SOFAR, SOund Fixing And Ranging) του οποίου ο άξονας βρίσκεται, κατά μέσο όρο, σε βάθος 1500 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με περίοδο μικρότερη του 1 sec και φαινόμενη ταχύτητα ίση με 1.5 km/sec.

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και πίεσης με το βάθος είναι τέτοιες ώστε να δημιουργείται σ' αυτό το βάθος **στρώμα μικρής ταχύτητας**, δηλαδή ο διάυλος. Η φάση Τ έχει μεγάλη σημασία από πρακτικής άποψης, γιατί η αναγραφή της από σταθμούς που βρίσκονται κοντά στις ακτές του Ειρηνικού ωκεανού αποτελεί **προειδοποίηση** για την **άφιξη θαλασσίων κυμάτων βαρύτητας** (tsunami) που προκαλούν καταστροφές σ' αυτές τις ακτές.

## Κύματα ανάκλασης



Σεισμογράμμα τοπικού σεισμού ( $\Delta=80$  km), που γράφτηκε από κατακόρυφο σεισμόμετρο Benioff του σταθμού Αθηνών, όπου δείχνεται και η φάση PmP.

Τα **κύματα ανάκλασης** είναι κύματα τα οποία αναχωρούν από την εστία του σεισμού που βρίσκεται μέσα στο φλοιό και **προσπίπτουν** στην ασυνέχεια **Mohorovicic**, όπου παθαίνουν **ανάκλαση**, και μετά επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης, όπου αναγράφονται από σεισμολογικούς σταθμούς σε **σχετικά μικρές επικεντρικές αποστάσεις**. Αν τόσο αυτό που προσπίπτει όσο και το ανακλώμενο κύμα στην επιφάνεια Mohorovicic είναι επιμήκη ή εγκάρσια, το αναγραφόμενο κύμα παριστάνεται με το **PmP** ή **SmS**, αντίστοιχα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν και **σύνθετες φάσεις**, δηλαδή, φάσεις στις οποίες τα κύματα που προσπίπτουν στην επιφάνεια Mohorovicic είναι επιμήκη ή εγκάρσια, ενώ τα ανακλώμενα κύματα είναι εγκάρσια ή επιμήκη. Τα κύματα αυτά παριστάνονται με **PmS** ή **SmP**, αντίστοιχα.

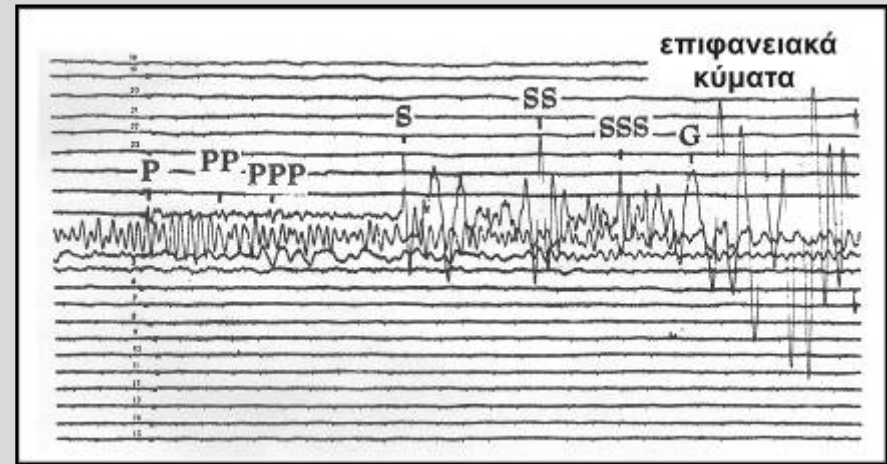
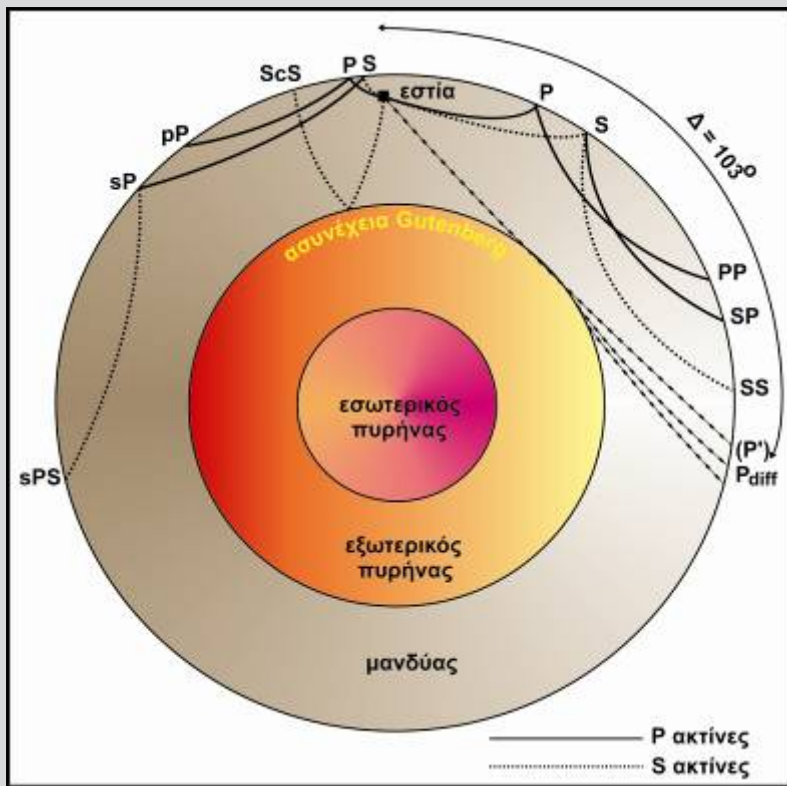
## Διάδοση των κυμάτων χώρου στον μανδύα

Ο **μανδύας** της Γης αρχίζει από την **ασυνέχεια Mohorovicic** και φθάνει μέχρι το βάθος των **2890 km**, όπου βρίσκεται η **ασυνέχεια Gutenberg**. Στο βάθος των **660 km** υπάρχει αλλαγή της δομής (**ασυνέχεια Lehmann**) και γι' αυτό στο βάθος αυτό ο μανδύας χωρίζεται στον **πάνω μανδύα** και στον **κάτω μανδύα**. Ο μανδύας αποτελείται **κυρίως** από πυριτικά άλατα, όπως είναι ο ολιβίνης ( $Mg_2SiO_4$ ,  $Fe_2SiO_4$ ).

- ◆ Η αιτία των γεωδυναμικών φαινομένων βρίσκεται στον πάνω μανδύα. Μεταξύ περίπου **60 και 220 km** υπάρχει **στρώμα χαμηλής ταχύτητας** το οποίο ονομάζεται **ασθενοσφαιρικός διάυλος** και παρέχει τη δυνατότητα σχετικώς εύκολης κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών πάνω στην **ασθενόσφαιρα** λόγω της ευκαμψίας (ρευστότητας) του υλικού του διαύλου.
- ◆ Από το βάθος των **220 km μέχρι το βάθος των 400 km** η ταχύτητα αυξάνεται αργά.
- ◆ Το στρώμα μεταξύ **410 km και 660 km** αποτελεί «**μεταβατική ζώνη**» που ορίζεται από τις ασυνέχειες των 410 km και των 660 km, στις οποίες οι **ταχύτητες** των κυμάτων χώρου **αυξάνουν απότομα**.
- ◆ Στον **κάτω μανδύα**, δηλαδή, από το βάθος των **660 km** μέχρι το βάθος των **2890 km** η **ταχύτητα** των κυμάτων χώρου **αυξάνεται ομαλά**.
- ◆ Τα κύματα που αναχωρούν από μια **εστία** η οποία βρίσκεται **μέσα στο φλοιό** και **προσπίπτουν** στην επιφάνεια **Mohorovicic** υπό **γωνία μικρότερη της ορικής** μπαίνουν μέσα στο μανδύα. Εκείνα από αυτά τα κύματα που διαδίδονται μέσα στο μανδύα και επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης **χωρίς** να μπουν μέσα στον πυρήνα λέγονται **κύματα μανδύα**.
- ◆ Τα απλούστερα κύματα μανδύα (**επιμήκη P**, **εγκάρσια S**) είναι αυτά που γεννιούνται σε εστία που βρίσκεται στο φλοιό, διαθλώνται στην ασυνέχεια Mohorovicic, διαδίδονται στο μανδύα και, αφού διαθλαστούν πάλι στην ασυνέχεια Mohorovicic, φθάνουν στην επιφάνεια της Γης. Τα P κύματα εμφανίζονται μέχρι την **απόσταση  $\Delta=103^\circ$** . Παρατηρούνται, όμως και κύματα P **πέρα** από την απόσταση αυτή, που λέγονται **κύματα περίθλασης (P' ή P<sub>diff</sub>)**.



## Διάδοση των κυμάτων χώρου στον μανδύα (συνέχεια)

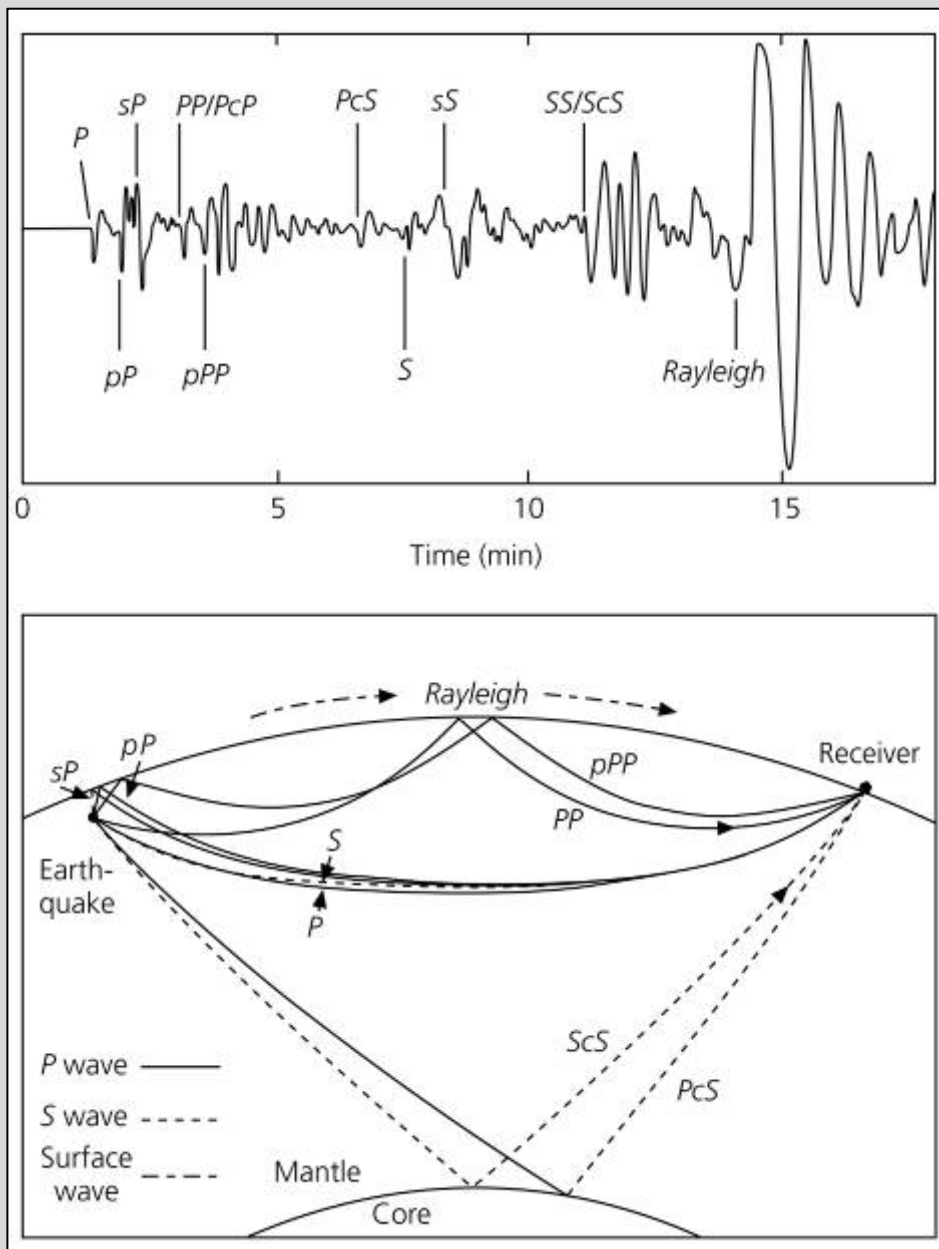


Αναγραφή κυμάτων μανδύα και επιφανειακών κυμάτων από μακράς περιόδου κατακόρυφο σεισμόμετρο που βρισκόταν σε απόσταση 75ο από το επίκεντρο (Garland, 1971).

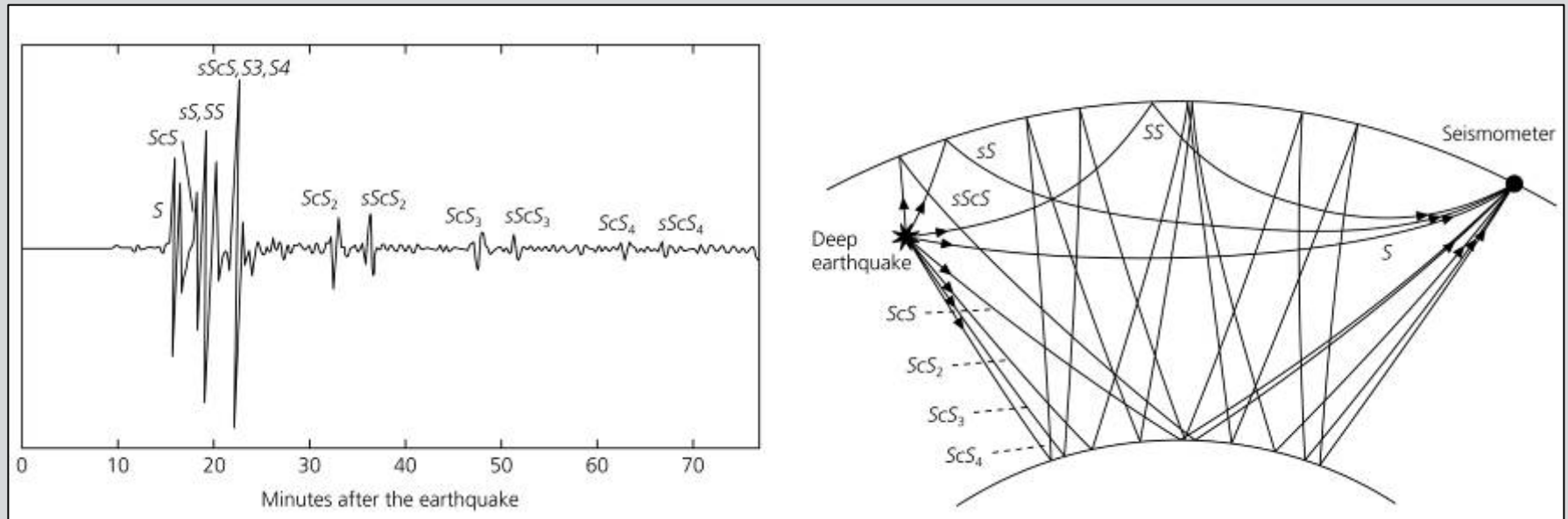
Διάδοση κυμάτων χώρου στο μανδύα.

- Τα **PP**, **SS** κύματα είναι κύματα που έχουν **ανακλασθεί μια φορά** στην επιφάνεια της Γης. Όταν υποστούν και δεύτερη ανάκλαση, τότε παρατηρούνται τα **PPP** κύματα, κλπ.
- Τα **PSP**, **SPS**, κλπ. είναι **σύνθετα κύματα**: το **πρώτο σύμβολο** δείχνει το είδος του κύματος που **αναχωρεί** από την εστία και το **τελευταίο σύμβολο** το είδος του κύματος που **φθάνει** στην επιφάνεια της Γης.
- Σε κύμα που, αφού υποστεί **ανάκλαση** στην **εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα**, φθάνει στην επιφάνεια της Γης, παρεμβάλλεται το σύμβολο **c** μεταξύ των κλάδων του πριν και μετά την ανάκλαση, π.χ. **PcP**, **ScS**, **PcS**.
- Στα σειсмоγράμματα των **σεισμών βάθους**, δηλαδή των σεισμών που οι εστίες τους βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 60 km, παρατηρήθηκαν **απλά και σύνθετα κύματα**, των οποίων το σημείο ανάκλασης βρίσκεται στην επιφάνεια και κοντά στο επίκεντρο. Τα κύματα αυτά παριστάνονται με τα σύμβολά **pP**, **sS**, **pS**, **sP**.

## Διάδοση των κυμάτων χώρου στον μανδύα (συνέχεια)



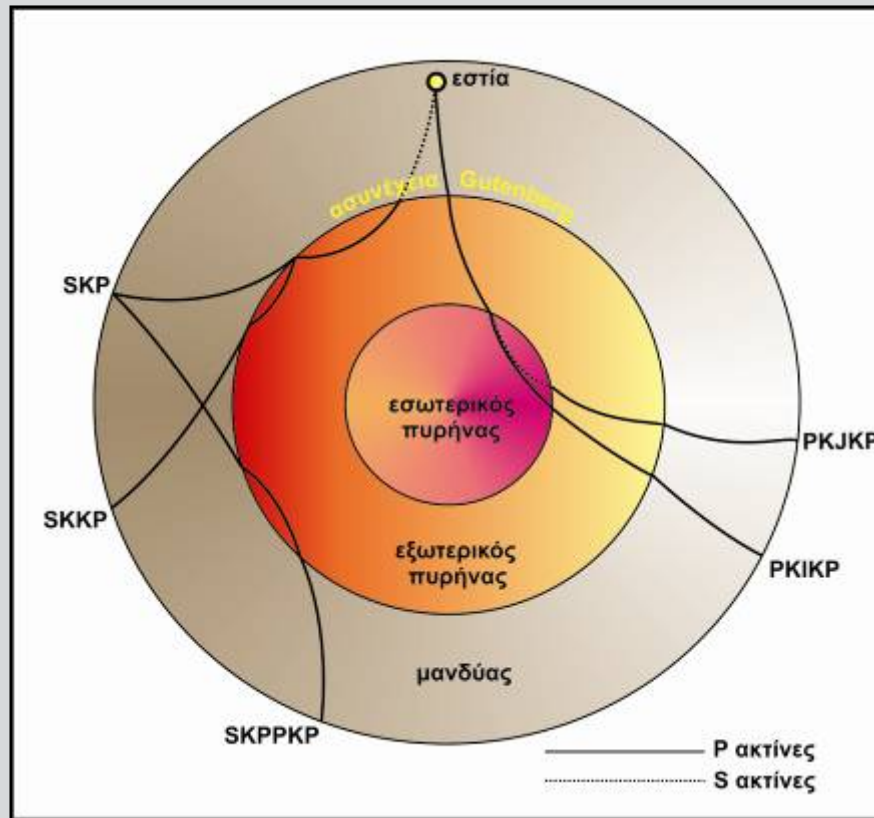
Διάδοση κυμάτων χώρου στο μανδύα (Stein and Wysession, 1993).



Καταγραφές σεισμικών κυμάτων τα οποία ανακλώνται στον εξωτερικό πυρήνα της Γης (Stein and Wysession, 1993).



## Διάδοση των κυμάτων χώρου στον πυρήνα



● Ο **πυρήνας** της Γης αρχίζει από την **επιφάνεια Gutenberg (2890 km)** και φθάνει μέχρι το **κέντρο της Γης (6371 km)**.

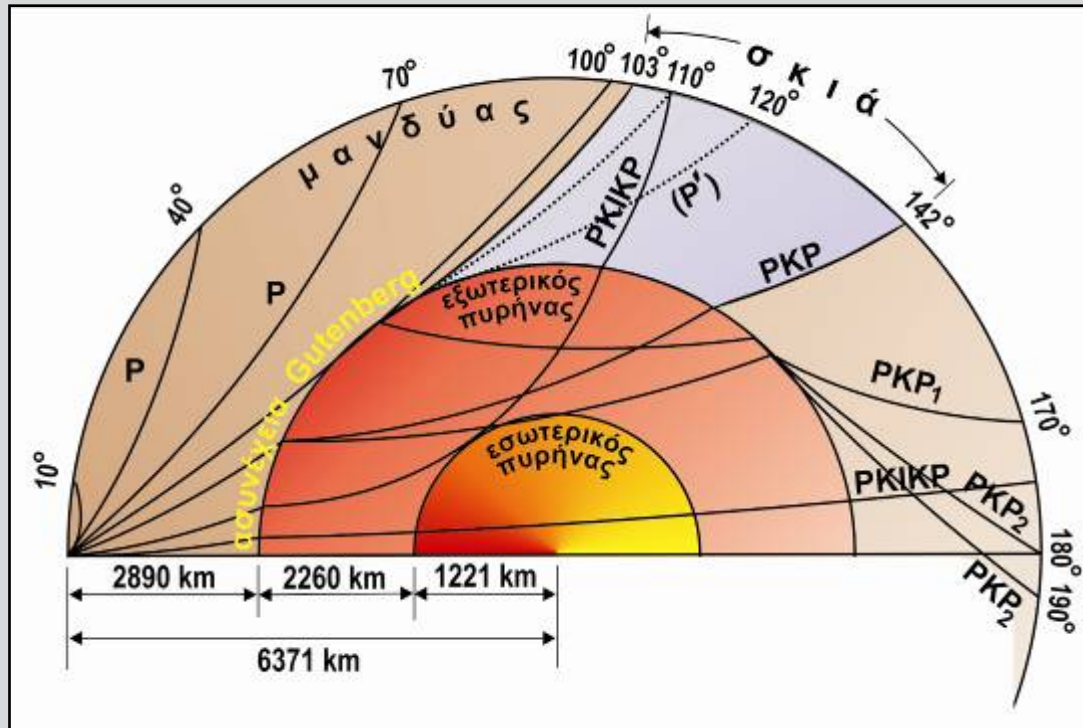
● Αυτός διακρίνεται στον **εξωτερικό πυρήνα**, ο οποίος βρίσκεται σε **υγρή** κατάσταση και στον **εσωτερικό πυρήνα**, ο οποίος βρίσκεται σε **στερεά** κατάσταση. Σήμερα, πιστεύεται ότι ο πυρήνας αποτελείται κατά κύριο λόγο από σίδηρο αλλά περιέχει και ενώσεις σιδήρου με ελαφρά στοιχεία (οξυγόνο, θείο) σε ποσοστό 8-10%.

● Στον **υγρό, εξωτερικό πυρήνα (2890-5150 km)** **δεν διαδίδονται εγκάρσια κύματα** ενώ η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων, αυξάνεται ομαλά με το βάθος.

● Στον **στερεό, εσωτερικό πυρήνα (5150-6371 km)** **διαδίδονται επιμήκη και εγκάρσια κύματα**. Η **ταχύτητα** τόσο των επιμήκων όσο και των εγκάρσιων κυμάτων διατηρείται **σχεδόν σταθερή**.

Ο κλάδος της τροχιάς ενός επιμήκους κύματος που βρίσκεται μέσα στον **εξωτερικό πυρήνα** παριστάνεται με το γράμμα **K**, που παρεμβάλλεται μεταξύ των συμβόλων του αρχικού και του τελικού κλάδου της σεισμικής ακτίνας. Π.χ., το **SKP** αντιστοιχεί σε κύμα που από την εστία διαδίδεται ως εγκάρσιο μέσα στο μανδύα, διαδίδεται στον εξωτερικό πυρήνα ως επίμηκες κύμα και κατόπιν επιστρέφει στο μανδύα και μέχρις ότου φθάσει στην επιφάνεια της Γης, διαδίδεται μέσα σ' αυτόν ως επίμηκες κύμα.

Ο κλάδος της σεισμικής ακτίνας του επιμήκους κύματος που βρίσκεται μέσα στον **εσωτερικό πυρήνα** παριστάνεται με το γράμμα **I**, ενώ ο κλάδος της τροχιάς του **εγκάρσιου κύματος** που βρίσκεται μέσα στον **εσωτερικό πυρήνα** παριστάνεται με το γράμμα **J**.



⊗ **PKP** ή **P'**: ακτίνες **επιμήκων** κυμάτων που από τον **μανδύα** πέρασαν **μια** φορά από τον **εξωτερικό πυρήνα**. **Αν** **ανακλαστούν** στην επιφάνεια της Γης και **ξαναπεράσουν** από τον εξωτερικό πυρήνα για να καταγραφούν στην επιφάνεια της Γης τότε συμβολίζονται με **P'P'**.

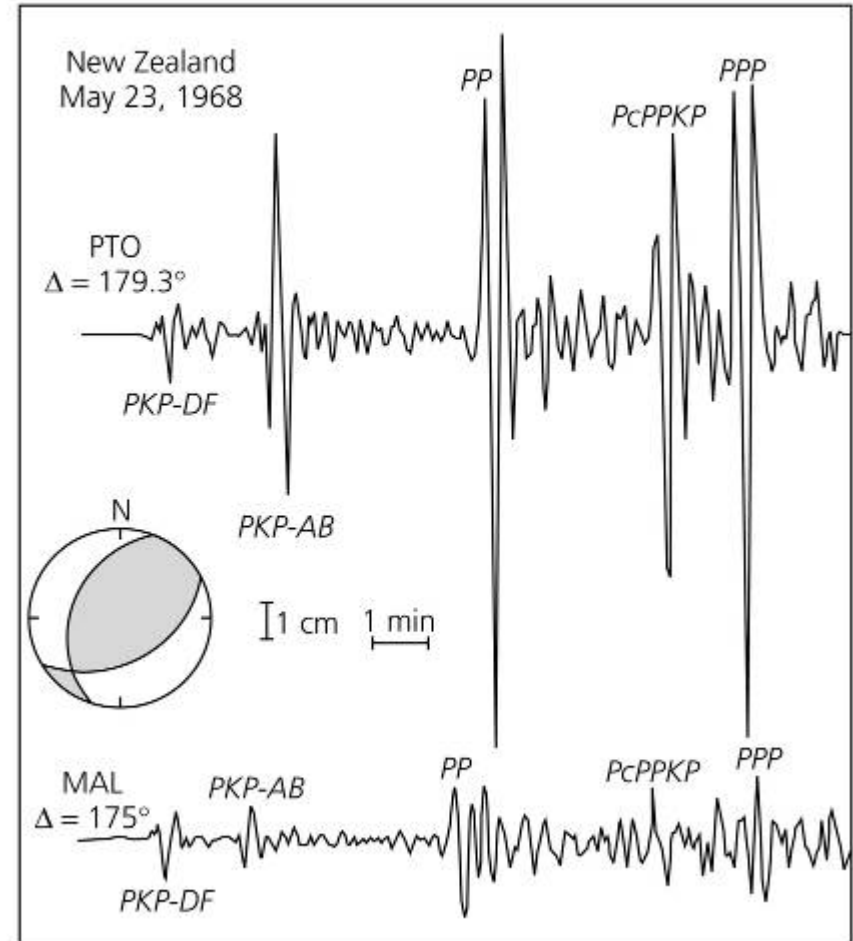
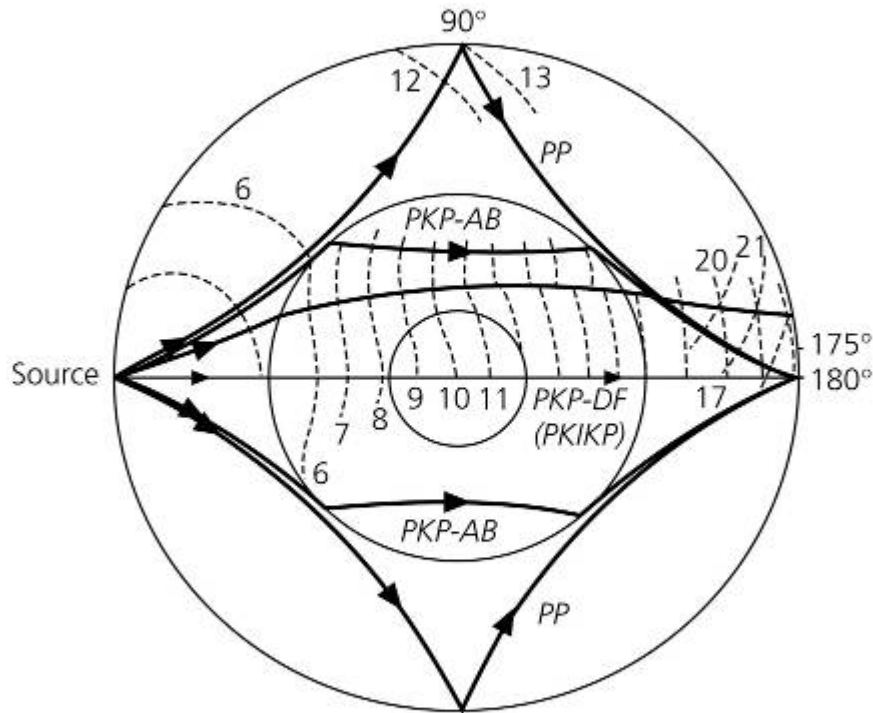
⊗ **PKIKP**: είναι ακτίνες **επιμήκων** κυμάτων που περνούν από το **μανδύα** περνούν πρώτα από **εξωτερικό** και έπειτα από τον **εσωτερικό πυρήνα**, επιστρέφουν στον **εξωτερικό πυρήνα**, και διαδίδόμενα στο **μανδύα** φθάνουν στην επιφάνεια της Γης. Παριστάνονται και με **P''**.

Ο πυρήνας της Γης ενεργεί ως «συγκλίνων φακός» για τις σεισμικές ακτίνες (Gutenberg and Richter, 1939, τροποποιημένο). Αυτό συμβαίνει γιατί η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων από 13.7 km/sec που είναι στο κατώτερο όριο του μανδύα, ελαττώνεται στα 8.7 km/sec στο πάνω μέρος του πυρήνα.

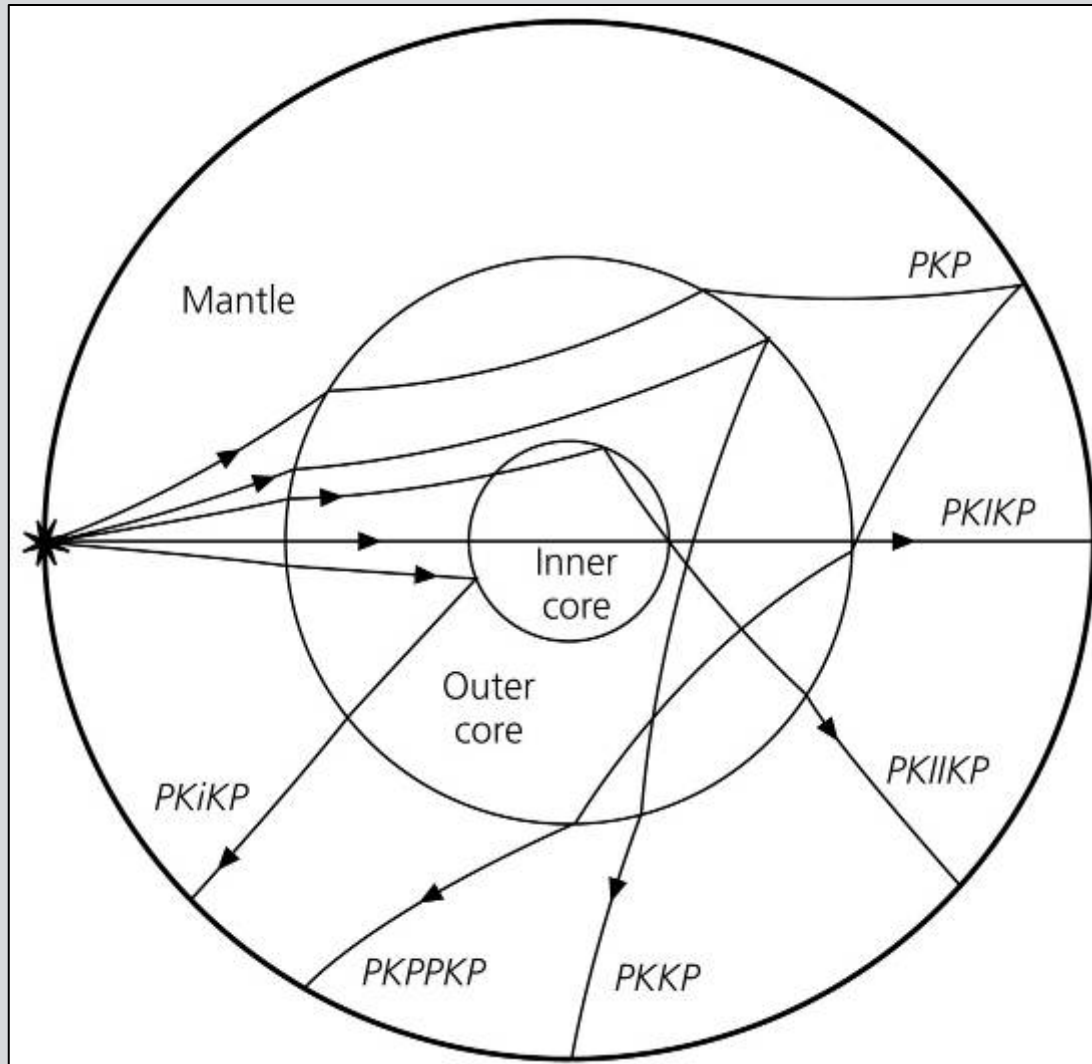
⊗ **PKP<sub>2</sub>** ή **P'<sub>2</sub>**: είναι ακτίνες **επιμήκων** κυμάτων που προσπίπτουν στην **επιφάνεια του πυρήνα** υπό **γωνία** λίγο **μικρότερη** από τη γωνία υπό την οποία προσπίπτει σ' αυτήν η ακτίνα η εφαιπτόμενη του πυρήνα (**P'**), αναδύονται σε απόσταση **190°** (ενεργός επικεντρική απόσταση **170°**). Για **λίγο μικρότερη γωνία** πρόσπτωσης η ακτίνα αναδύεται σε απόσταση **180°**. Όταν ελαττώνεται η γωνία πρόσπτωσης, ελαττώνεται και η γωνία ανάδυσης της σεισμικής ακτίνας μέχρι να αποκτήσει η γωνία πρόσπτωσης τιμή που αντιστοιχεί στη θέση **ελάχιστης εκτροπής**, οπότε η απόσταση ανάδυσης της σεισμικής ακτίνας είναι **142°** περίπου.

- ☉ Με παραπέρα ελάττωση της γωνίας πρόσπτωσης, δεν εξακολουθεί να ελαττώνεται η απόσταση ανάδυσης, αλλά αρχίζει να αυξάνεται πάλι. Δημιουργείται έτσι **σκιερή ζώνη** μεταξύ **103°** και **142°**. Κατά την ελάττωση της γωνίας πρόσπτωσης, η απόσταση αυξάνει μέχρις ότου η γωνία πρόσπτωσης αποκτήσει τέτοια τιμή, ώστε η **σεισμική ακτίνα** να **εφάπτεται** σχεδόν της **επιφάνειας του εσωτερικού πυρήνα**. Τα κύματα αυτά παριστάνονται με το σύμβολο **PKP** ή **PKP<sub>1</sub>** ή **P<sub>1</sub>'**.
- ☉ Τα κύματα **PKP<sub>1</sub>** και **PKP<sub>2</sub>** φθάνουν συγχρόνως στην απόσταση των **142°** με συνέπεια την ισχυρή **συγκέντρωση σεισμικής ενέργειας** κατά μήκος της καμπύλης η οποία περιβάλλει το **αντιποδικό σημείο** του επικέντρου σε απόσταση **38°**. Η καμπύλη αυτή λέγεται **καυστική**. Έντονη συγκέντρωση σεισμικής ενέργειας παρατηρείται και στο αντιποδικό σημείο του επικέντρου.
- ☉ Η ακτίνα η **εφαπτόμενη** στην **επιφάνεια του εσωτερικού πυρήνα**, αναδύεται σε απόσταση **110°**.

Antipodal focusing

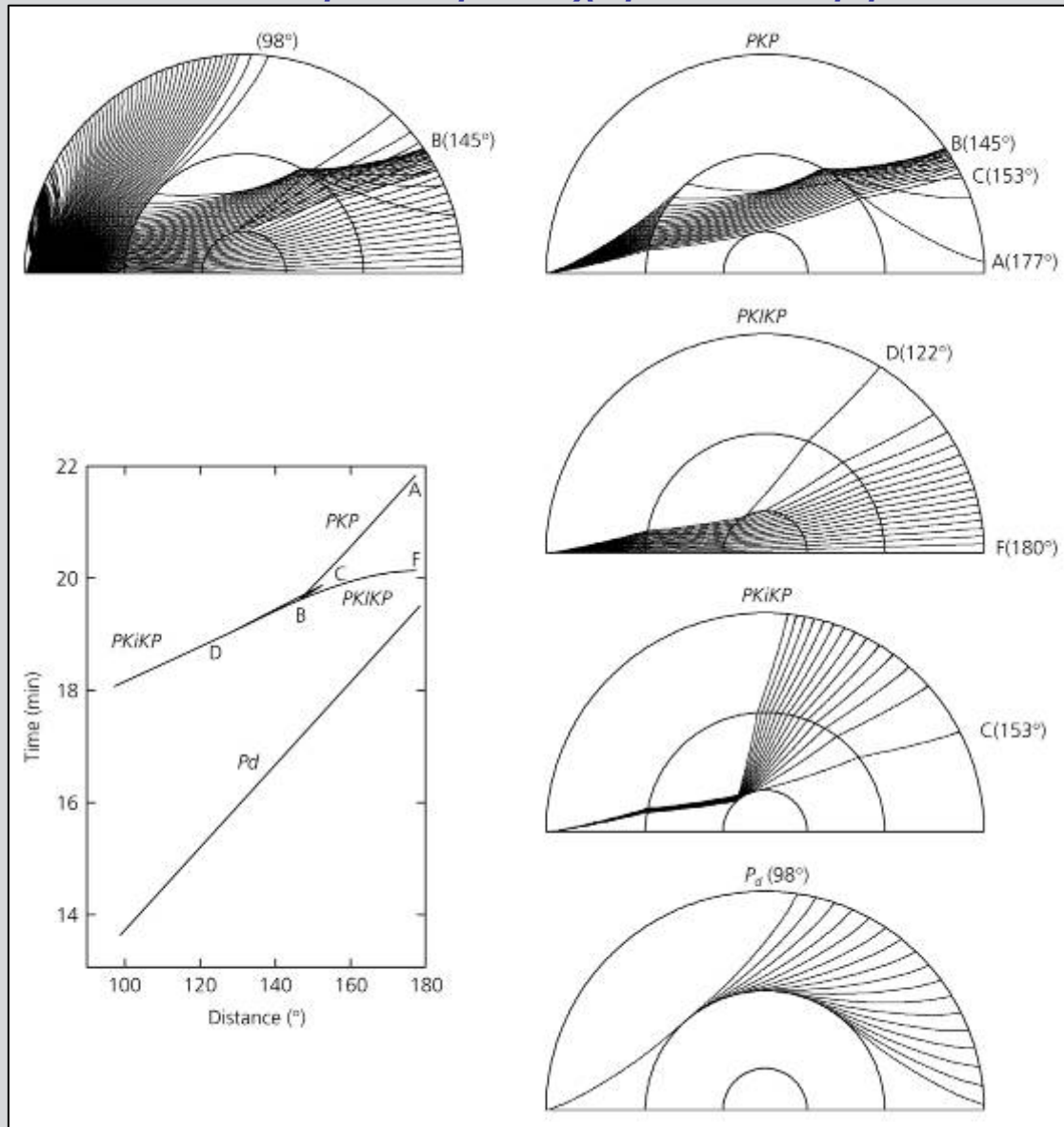


Συγκέντρωση σεισμικών κυμάτων στο αντιποδικό σημείο του επικέντρου (Stein and Wysession, 1993)



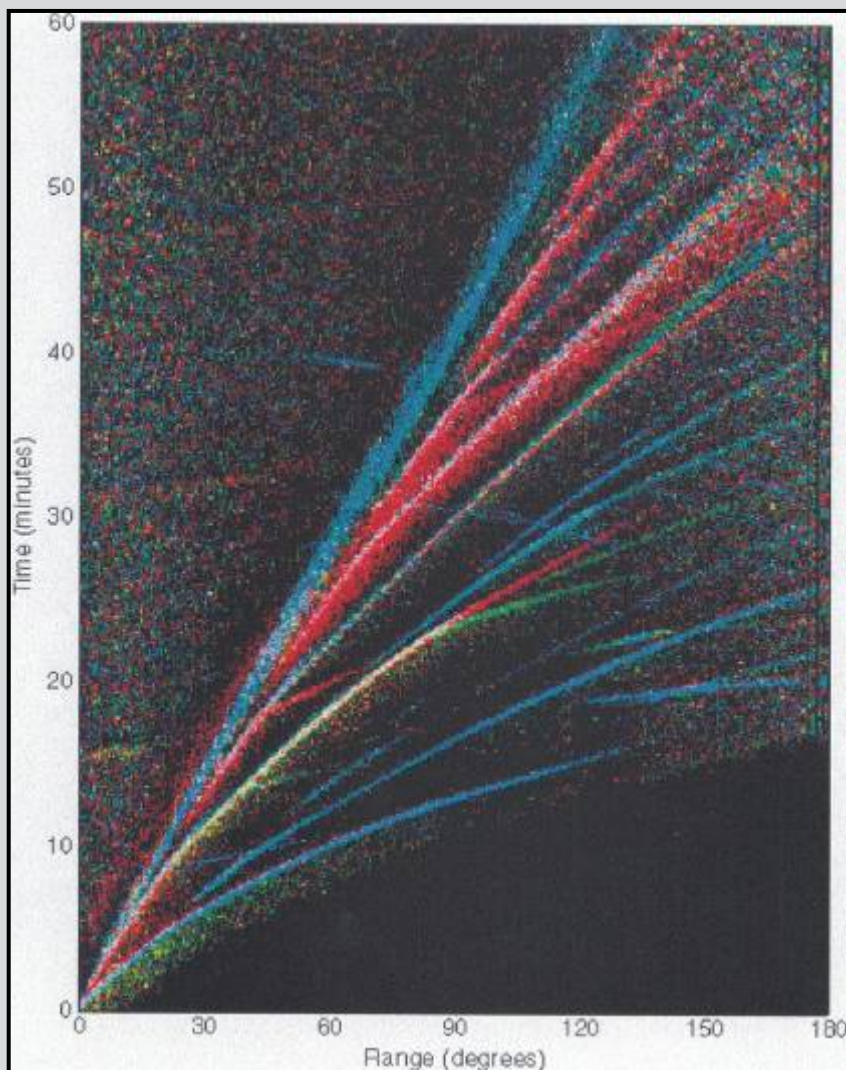
Διάδοση σεισμικών κυμάτων στον πυρήνα της Γης (Stein and Wysession, 1993)



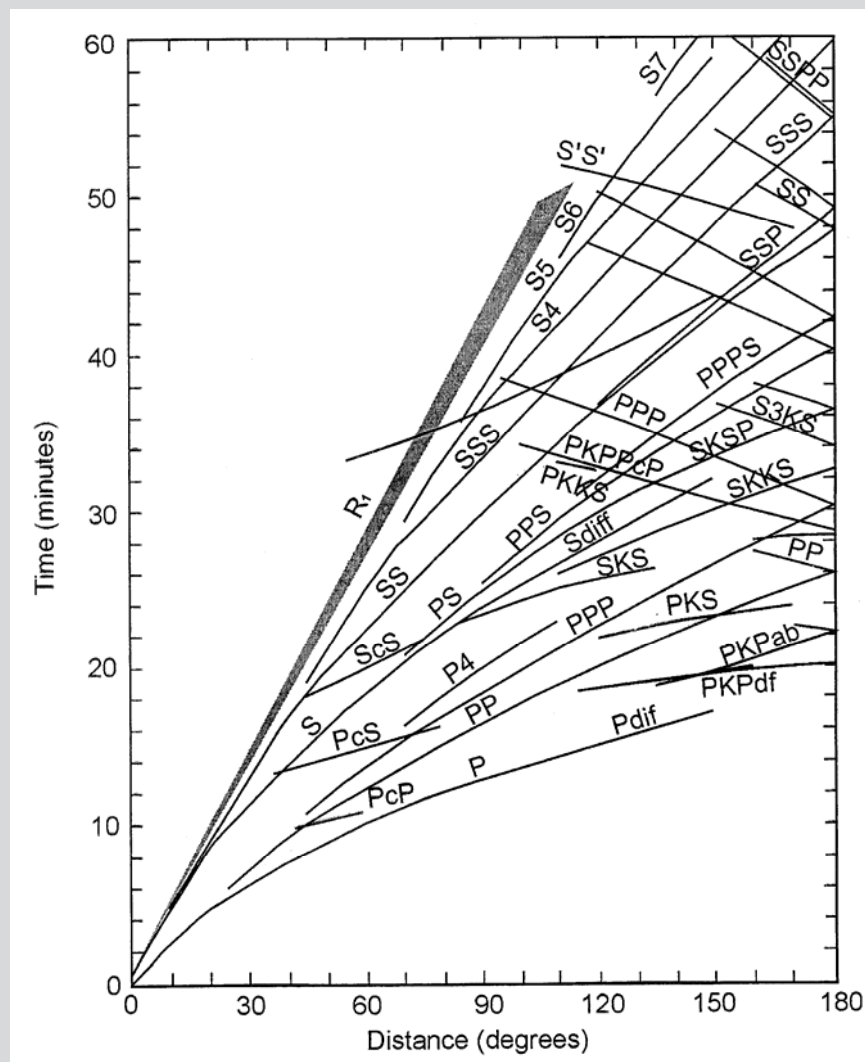


Διάδοση σεισμικών κυμάτων στον πυρήνα της Γης και αντίστοιχες καμπύλες χρόνων διαδρομής (Stein and Wysession, 1993)

## Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων μανδύα και πυρήνα



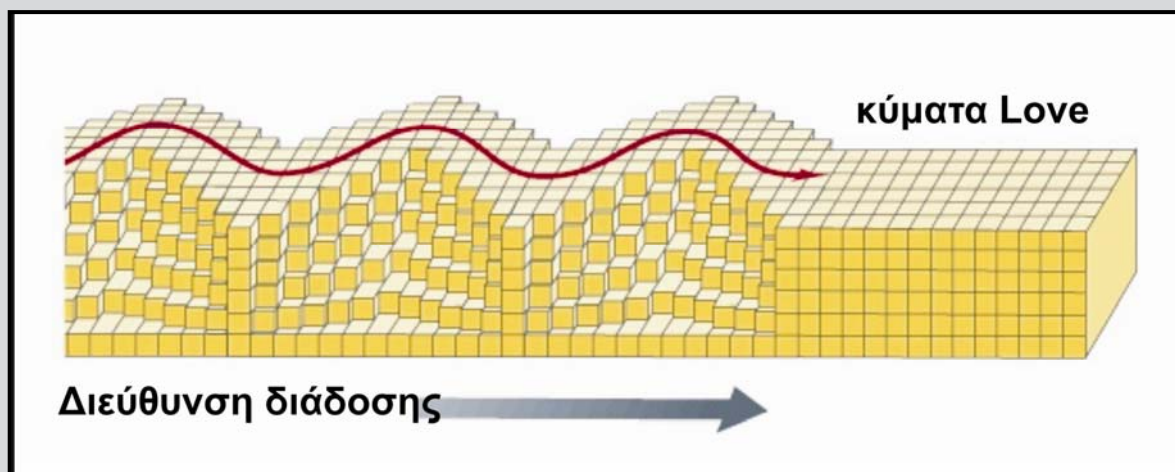
Χρόνοι άφιξης διαφόρων φάσεων των σεισμικών κυμάτων σε συνάρτηση με τις επικεντρικές τους αποστάσεις (βάση δεδομένων IRIS).



Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων μανδύα και των κυμάτων πυρήνα για επιφανειακούς σεισμούς (Kennett and Engdahl, 1991).



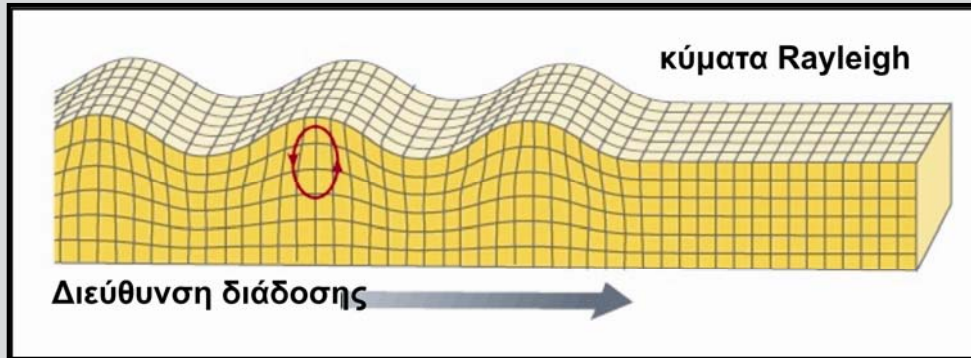
Από τα **επιφανειακά κύματα** μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη Σεισμολογία παρουσιάζουν τα κύματα **Rayleigh** και **Love**. Και τα δύο είδη των κυμάτων αυτών παθαίνουν **σκέδαση**, δηλαδή, η ταχύτητα διάδοσής τους εξαρτάται από την περίοδο. Η σκέδαση τους είναι συνήθως **κανονική**, δηλαδή, η ταχύτητα αυξάνεται όταν αυξάνεται η περίοδος. Η διάδοση των επιφανειακών κυμάτων **μικρής περιόδου** επηρεάζεται κυρίως από τις ιδιότητες του **φλοιού**, ενώ η διάδοση των κυμάτων **μεγάλης περιόδου** επηρεάζεται από τις ιδιότητες του **πάνω μανδύα**.



Κατά τη διάδοση των κυμάτων **Love**, τα υλικά σημεία πραγματοποιούν ταλαντώσεις σε ευθείες **παράλληλες προς το οριζόντιο επίπεδο** και **κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος**.

Τα κύματα αυτά είναι κύματα **οριζοντίως πολωμένα** και για το λόγο γράφονται **μόνο** από τα **οριζόντια σεισμόμετρα**. Οι περίοδοι των κυμάτων Love κυμαίνονται μεταξύ 8 και 140 sec, συνήθως. Τα μεγάλης περιόδου κύματα έχουν σχετικώς μεγάλη μέση ταχύτητα (**4.5 km/sec**) επειδή κατά τη διάδοσή τους επηρεάζονται από τη δομή του πάνω μανδύα και των βαθύτερων στρωμάτων του φλοιού.

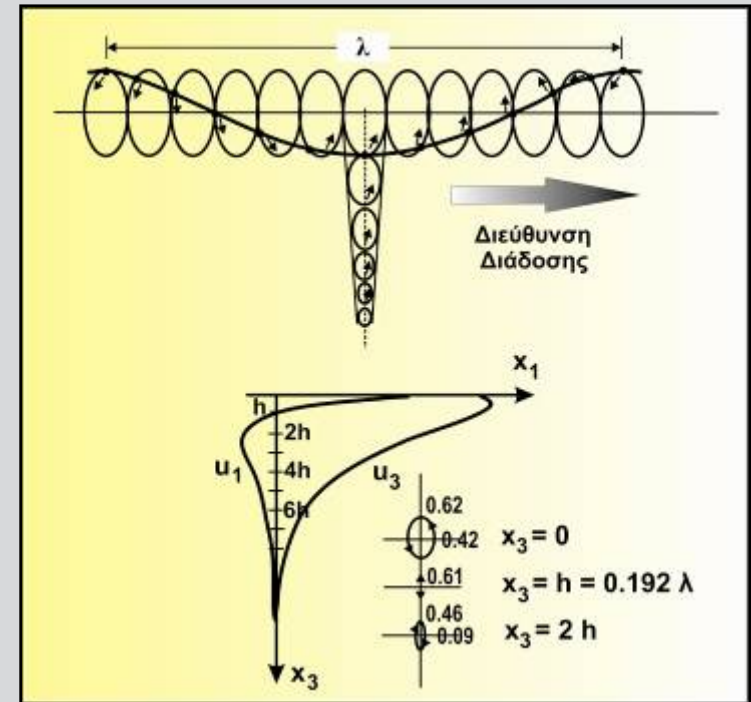
Τα κύματα αυτά παριστάνονται με το **LQ** και **γράφονται αμέσως μετά τα εγκάρσια κύματα από τα μεγάλης περιόδου οριζόντια σεισμόμετρα**. Τα κύματα Love δεν διαδίδονται σε ομογενές μέσο.



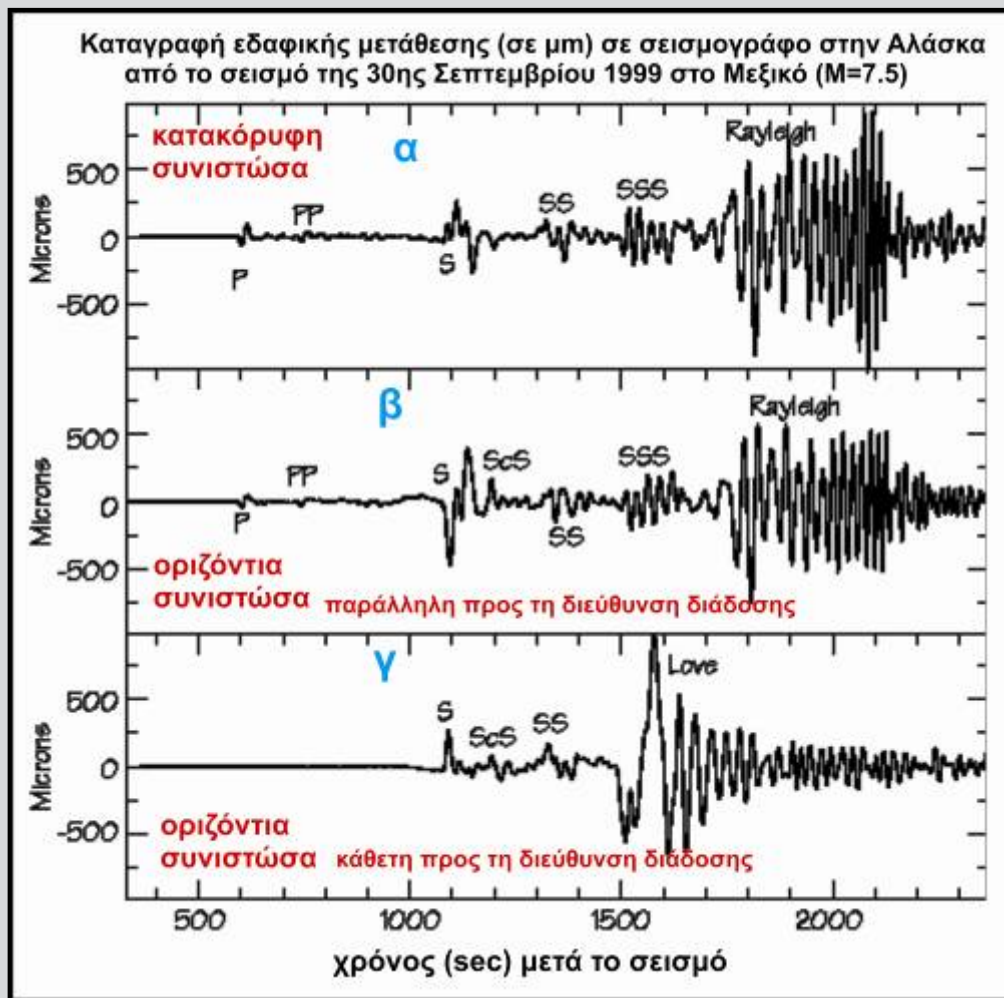
Στη διάδοση των **κυμάτων Rayleigh**, τα υλικά σημεία διαγράφουν ελλείψεις οι οποίες έχουν το **μέγιστο άξονα κατακόρυφο** και τον ελάχιστο κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Το **πλάτος ταλάντωσης** των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των κυμάτων Rayleigh **ελαττώνεται εκθετικά με το βάθος**, όπως φαίνεται στο σχήμα δεξιά. Κοντά στην επιφάνεια της Γης, η φορά κίνησης του υλικού σημείου πάνω στην ελλειπτική τροχιά του είναι τέτοια ώστε αυτή να συμπίπτει με τη φορά διάδοσης του κύματος στο κατώτερο σημείο της τροχιάς. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αυτών μέσα σε ομογενές μέσο είναι περίπου ίση με τα 9/10 της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων και γι' αυτό αυτά **γράφονται** από τα **κατακόρυφα** και τα **οριζόντια σεισμόμετρα αμέσως μετά τα εγκάρσια κύματα**. Τα πλάτη στα κατακόρυφα σεισμόμετρα είναι, όπως αναμένεται, μεγαλύτερα από τα πλάτη στα οριζόντια σεισμόμετρα.

Τα μεγάλης περιόδου κύματα, των οποίων η διάδοση επηρεάζεται από τη δομή του πάνω μανδύα και των βαθύτερων στρωμάτων του φλοιού, παριστάνονται με το **LR** και έχουν **μέση ταχύτητα 4.0 km/sec** περίπου.

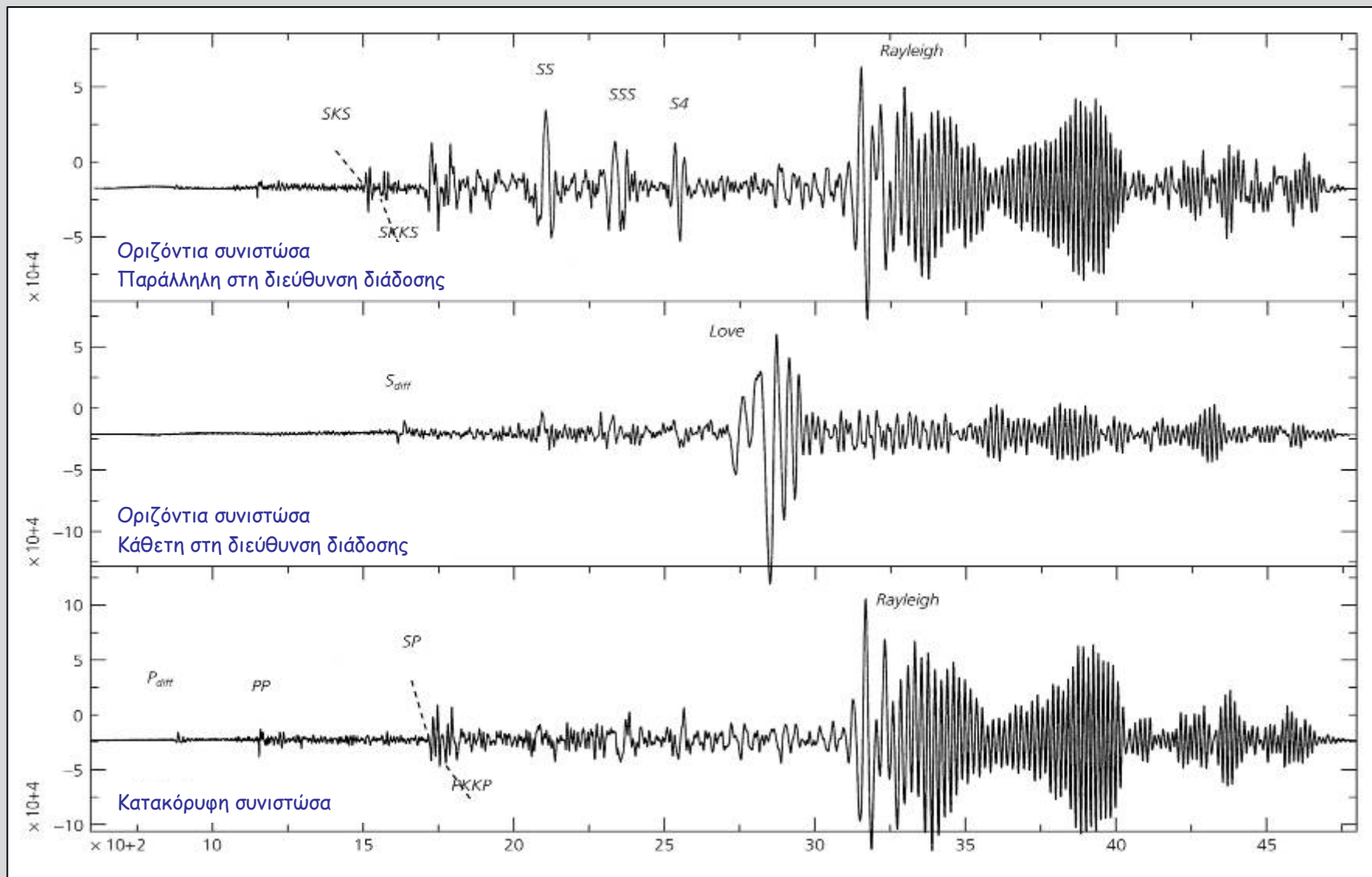


Μεταβολή του πλάτους και της φοράς ταλάντωσης των υλικών σημείων με το βάθος κατά τη διάδοση θεμελιώδους κύματος Rayleigh (Sheriff and Geldart, 1982).



Το σχήμα (α) παριστάνει σεισμόγραμμα θεμελιώδους κύματος Rayleigh, που λήφθηκε από κατακόρυφο σεισμόμετρο ευρέος φάσματος. Φαίνεται ότι η περίοδος των κυμάτων αυτών ελαττώνεται με το χρόνο, δηλαδή, τα κύματα αυτά παθαίνουν μέσα στη Γη κανονική σκέδαση. (β) Κύματα Rayleigh καταγράφηκαν και στο οριζόντιο σεισμόμετρο με μικρότερα πλάτη.

Το σχήμα (γ) παριστάνει σεισμόγραμμα το οποίο λήφθηκε με οριζόντιο σεισμόμετρο ευρέος φάσματος και στο οποίο δείχνεται η αναγραφή θεμελιώδους κύματος Love. Φαίνεται ότι και η περίοδος του κύματος αυτού ελαττώνεται με το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι τα μεγάλης περιόδου κύματα φθάνουν νωρίτερα στο σταθμό και συνεπώς η ταχύτητα αυτών είναι μεγαλύτερη, δηλαδή, τα κύματα αυτά έπαθαν κανονική σκέδαση.



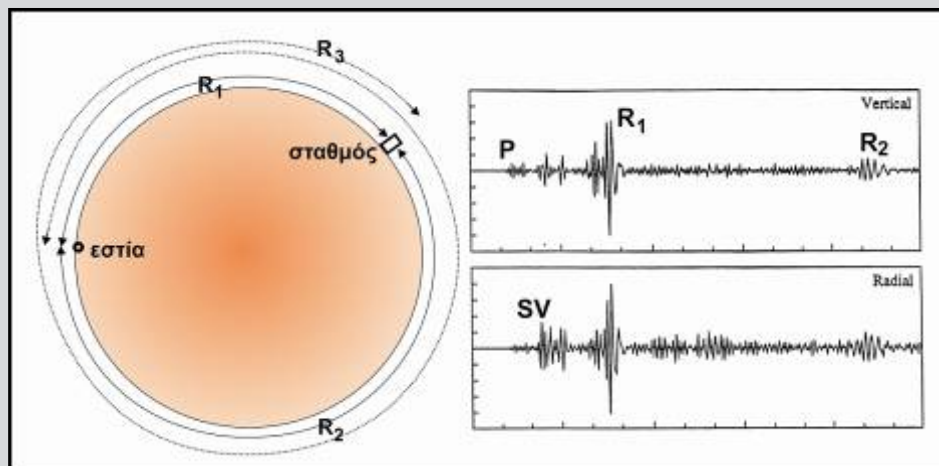
Σεισμόγραμμα σε επικεντρική απόσταση  $110^\circ$  στο οποίο φαίνονται οι καταγραφές των κυμάτων Rayleigh Love (Stein and Wyssession 2003).



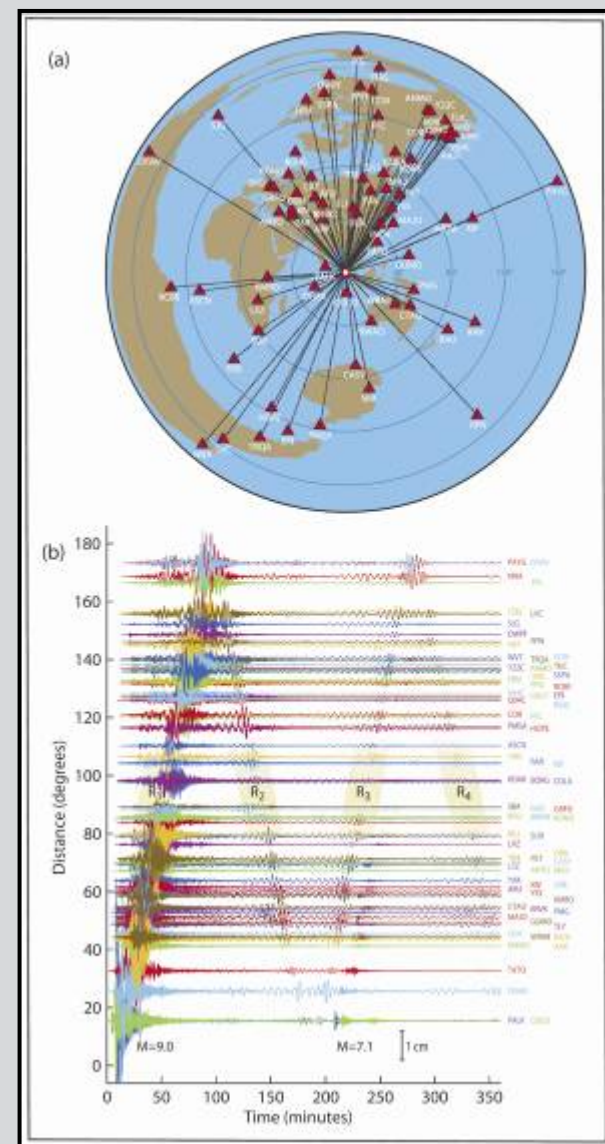
Κύματα περιστροφής

Αυτά είναι κύματα **Rayleigh**, που γράφονται σε ένα σταθμό, αφού διατρέξουν μερικές φορές το μέγιστο κύκλο της Γης που περνάει από το επίκεντρο και το σταθμό.

Παριστάνονται με το  $R_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ . Με το  $R_1$  παριστάνεται το απ' ευθείας κύμα, με το  $R_2$  το κύμα που φθάνει στο σταθμό αφού πρώτα περάσει από τα αντιποδικά σημεία του σταθμού και του επικέντρου, με το  $R_3$  το κύμα που κάνει μια περιστροφή περισσότερο από το  $R_1$ , κλπ. Οι περίοδοι των κυμάτων περιστροφής κυμαίνονται μεταξύ 70 sec και 10 min. Υπάρχουν αναγραφές τέτοιων κυμάτων που διέτρεξαν τη Γη περισσότερο από 15 φορές.



Τροχιές κυμάτων περιστροφής Rayleigh (αριστερά). Δείχνονται οι τροχιές των κυμάτων  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Κατακόρυφη και οριζόντια συνιστώσα αναγραφής σεισμού (δεξιά). Διακρίνονται οι αναγραφές των κυμάτων  $R_1$  και  $R_2$  (Priestley, 2000, τροποποιημένο).



Καταγραφές κυμάτων περιστροφής του σεισμού της Σουμάτρας (26.12.2004,  $M=9.2$ ).

## Ελεύθερη Ταλάντωση της Γης

Οι ελεύθερες ταλαντώσεις είναι στάσιμα κύματα που μπορούν να θεωρηθούν ως συνέπεια συμβολής αντίθετα διαδιδόμενων επιφανειακών κυμάτων.

• Οι σφαιροειδείς ταλαντώσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι παράγονται κατά τη συμβολή αντίθετα διαδιδόμενων μακράς περιόδου κυμάτων Rayleigh και παριστάνονται με το σύμβολο

$${}_n S_k^m$$

• Οι στροφικές ταλαντώσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι παράγονται κατά τη συμβολή αντίθετα διαδιδόμενων μακράς περιόδου κυμάτων Love και παριστάνονται με το σύμβολο

$${}_n T_k^m$$

Και στις δύο περιπτώσεις, τα  $n$ ,  $k$ ,  $m$  είναι ακέραιοι, ή ίσοι με μηδέν, αριθμοί που καθορίζουν τους αρμονικούς.

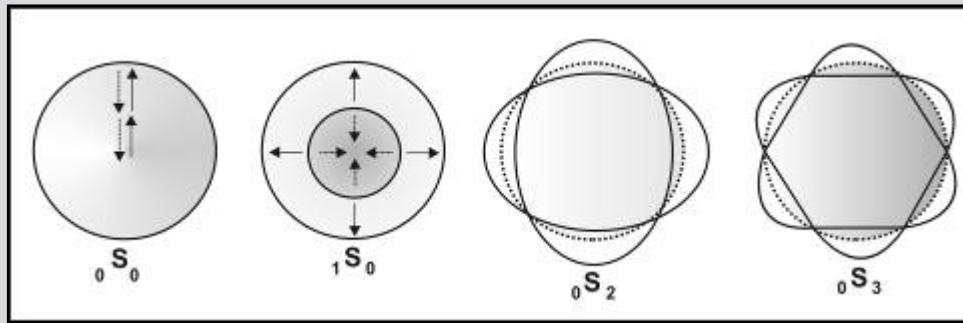
■ Ο  $k$  αποτελεί μέτρο του αριθμού των περιφερειών της σφαίρας της Γης, οι οποίες είναι παράλληλες προς ορισμένο μέγιστο κύκλο (ισημερινό) και που τα σημεία τους είναι κόμβοι, δηλαδή, δεν υφίστανται μετάθεση κατά την ταλάντωση. Στην περίπτωση σφαιροειδούς ταλάντωσης, ο  $k$  παριστάνει τον αριθμό των περιφερειών μηδενικού πλάτους ταλάντωσης ενώ στην περίπτωση στροφικής ταλάντωσης, ο αριθμός των περιφερειών μηδενικού πλάτους είναι ίσος προς  $k-1$ .

■ Ο  $m$  παριστάνει τον αριθμό των περιφερειών μηδενικού πλάτους, που τα επίπεδά τους είναι κάθετα στον ισημερινό. Ο ισημερινός δεν είναι ο γεωγραφικός ισημερινός αλλά ορισμένος μέγιστος κύκλος της Γης του οποίου ο προσανατολισμός καθορίζεται από το σεισμό που διεγείρει την ταλάντωση.

■ Ο  $n$  παριστάνει τον αριθμό των σφαιρικών επιφανειών που είναι συγκεντρικές της επιφάνειας της Γης και τα σημεία τους αποτελούν κόμβους.

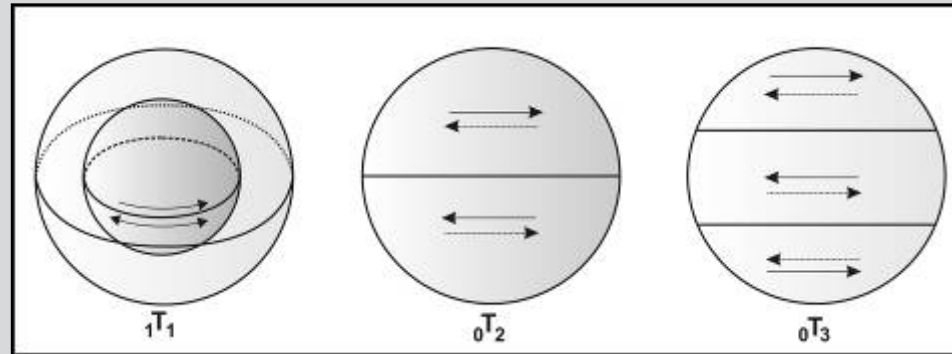
■ Συνήθως χρησιμοποιούνται τα σύμβολα  ${}_n S_k, {}_n T_k$ .





Σφαιροειδείς ταλαντώσεις.

- Με το  ${}^0S_0$  παριστάνεται η **θεμελιώδης** ταλάντωση κατά την οποία η Γη πραγματοποιεί **συστολές** και **διαστολές** χωρίς να μεταβάλλεται το σχήμα αυτής.
- Το  ${}^1S_0$  παριστάνει ταλάντωση κατά την οποία υπάρχει **μέσα** στη Γη **μηδενική επιφάνεια**. Το περικλειόμενο από τη μηδενική επιφάνεια τμήμα της Γης εκτελεί δική του ταλάντωση, που είναι ακτινική συστολή και διαστολή. Τέτοια ταλάντωση πραγματοποιεί και το τμήμα της Γης που βρίσκεται έξω από τη μηδενική επιφάνεια.
- Με το  ${}^0S_2$  παριστάνεται η ταλάντωση που ονομάζεται «**ταλάντωση σφαίρας ράκμπυ**», γιατί κατ' αυτήν η Γη **επιμηκύνεται διαδοχικά** κατά τις διευθύνσεις δύο καθέτων διαμέτρων. Η ταλάντωση αυτή έχει τη **μεγαλύτερη περίοδο** απ' όλες τις ταλαντώσεις της Γης ( $T=54 \text{ min}$ ).
- Το  ${}^0S_3$  παριστάνει ταλάντωση κατά την οποία το **πλάτος** γίνεται **συγχρόνως μέγιστο** κατά **τρεις** διευθύνσεις, που σχηματίζουν γωνίες  $120^\circ$  μεταξύ τους ή κατά τις τρεις διχοτόμους των γωνιών αυτών, εναλλασσόμενα.

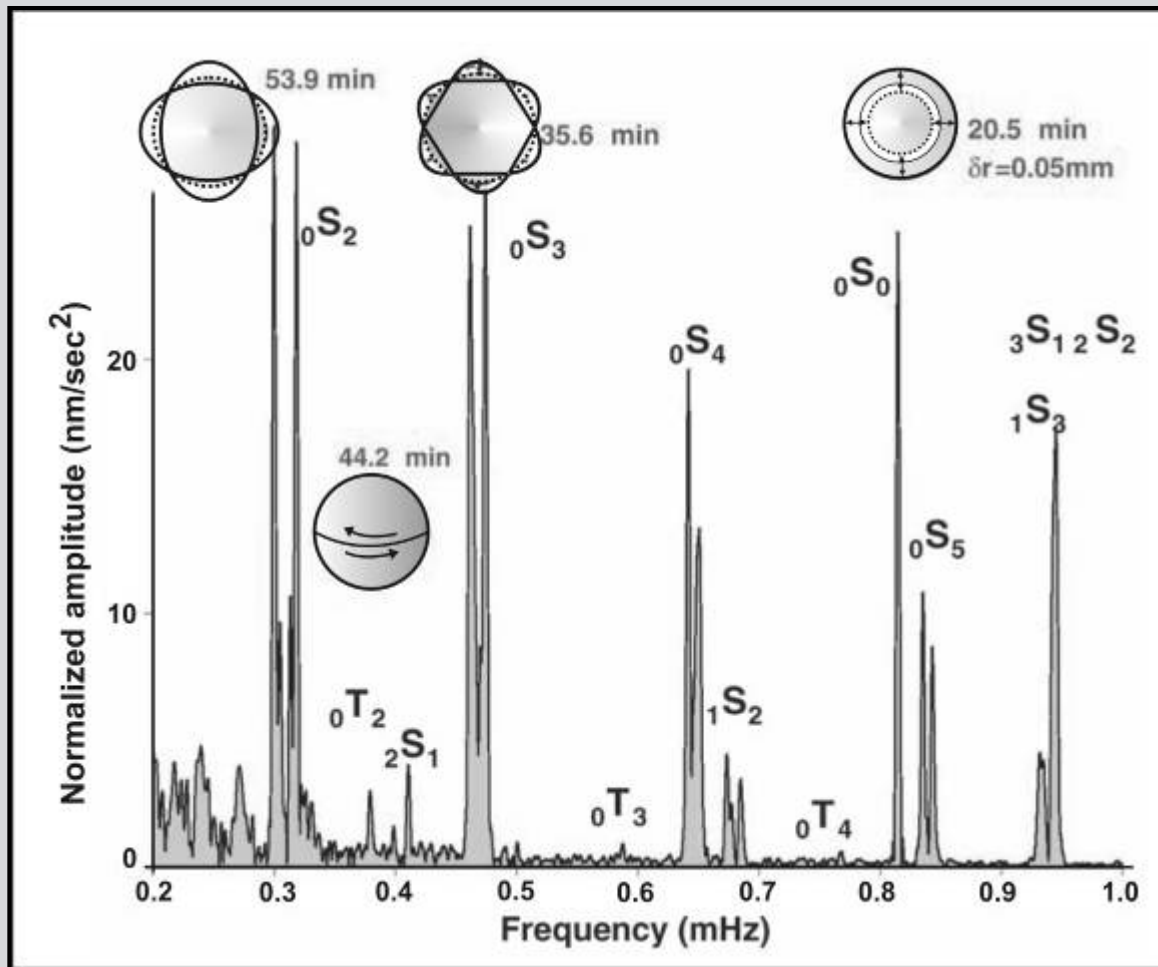


Στροφικές ταλαντώσεις.

■ Το  ${}_1T_1$  παριστάνει στροφική ταλάντωση, κατά την οποία υπάρχει **μηδενική σφαιρική επιφάνεια ομόκεντρη** της επιφάνειας της Γης, της οποίας η ακτίνα  $r$  δίνεται σε συνάρτηση με τη γήινη ακτίνα,  $R$ , από τη σχέση  $r=0.7796 R$ . Κατά την ταλάντωση αυτή, το **μέρος της Γης** που βρίσκεται στο **εσωτερικό** της μηδενικής επιφάνειας εκτελεί **περιστροφική** ταλάντωση γύρω από ορισμένη διάμετρο, ενώ το **μέρος** της Γης που βρίσκεται στο **εξωτερικό** της επιφάνειας αυτής, εκτελεί **όμοια ταλάντωση** αλλ' **αντίθετης** φοράς.

■ Με το  ${}_0T_2$  παριστάνεται ταλάντωση κατά την οποία **δύο ημισφαίρια**, στα οποία διαιρείται η Γη από ένα **μέγιστο** κύκλο, **ταλαντώνονται κατ' αντίθετες φορές** γύρω από τη διάμετρο που περνάει από τους πόλους αυτών.

■ Κατά την ταλάντωση  ${}_0T_3$  η Γη χωρίζεται με **δύο μηδενικούς παράλληλους** κύκλους σε **τρεις σφαιρικές ζώνες**. Οι ζώνες αυτές πραγματοποιούν **στροφικές ταλαντώσεις** γύρω από τον άξονα συμμετρίας τους.



Φάσμα κυματομορφής του σεισμού που έγινε στη Σουμάτρα στις 26 Δεκεμβρίου 2004 ( $M=9.2$ ), όπως αυτός αναγράφηκε από βαρυτόμετρο στην Καμπέρα της Αυστραλίας (διάρκεια της αναγραφής: 240 ώρες). Φαίνονται αρμονικοί στροφικών και σφαιροειδών ταλαντώσεων καθώς επίσης και σχηματικές αναπαραστάσεις των ταλαντώσεων  ${}_0S_2$ ,  ${}_0T_2$ ,  ${}_0S_3$  και  ${}_0S_0$  (Park et al., 2005, τροποποιημένο).

Η μεταβολή των πλατών των σεισμικών κυμάτων κατά τη διάδοσή τους στο εσωτερικό της Γης **εξαρτάται** από τις **ιδιότητες** του **μέσου διάδοσης**. Εδώ, παρουσιάζονται τρεις τέτοιες περιπτώσεις με ιδιαίτερο ενδιαφέρον,

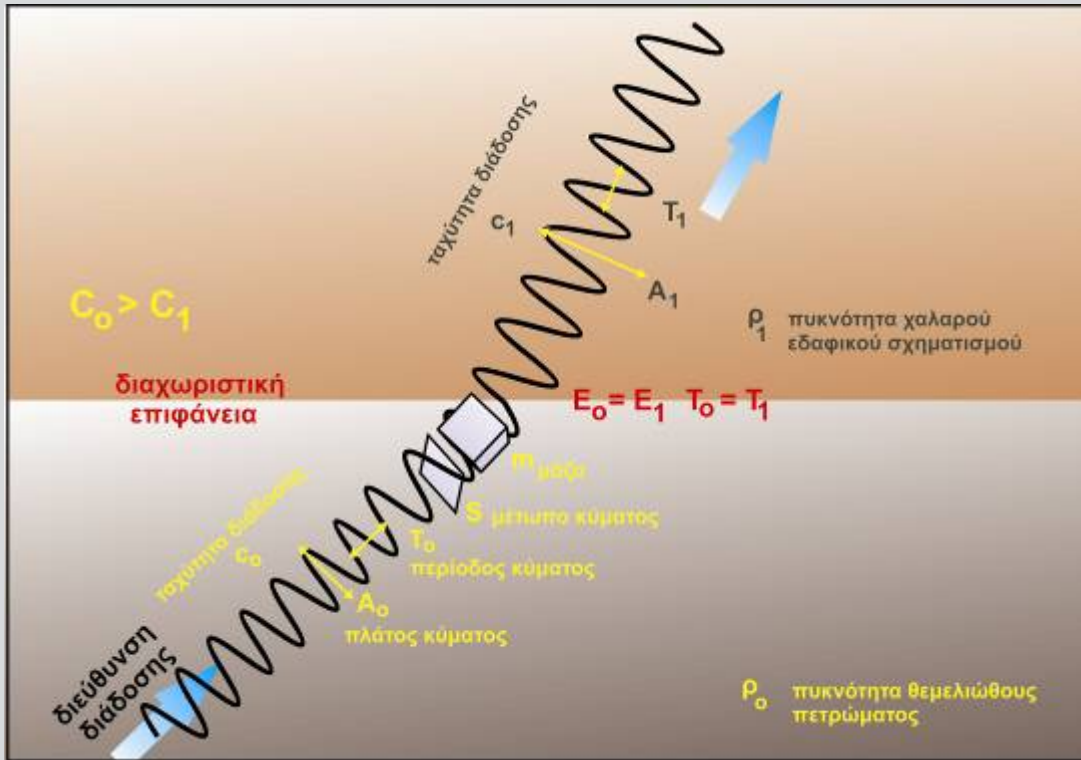
- την περίπτωση που το μέσο είναι **ελαστικό**
- την περίπτωση που το μέσο είναι **ανελαστικό**
- την περίπτωση που το μέσο είναι **ανελαστικό και ανομοιογενές**

### Ελαστικό μέσο

Στην περίπτωση που το μέσο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων είναι **τελείως ελαστικό**, η **μεταβολή του πλάτους** μπορεί να **οφείλεται**:

- στην **πρόσπτωση** του κύματος στη **διαχωριστική επιφάνεια** δύο ελαστικών μέσων με διαφορετικές ιδιότητες
- σε **γεωμετρική εξάπλωση** του κύματος.

Για την κατανόηση του αιτίου μεταβολής του πλάτους των σεισμικών κυμάτων, όταν αυτά προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, θα εξεταστεί η ενδιαφέρουσα από πρακτικής πλευράς περίπτωση όπου ένα αρμονικό κύμα, το οποίο διαδίδεται σε ένα σκληρό πέτρωμα (υπόβαθρο) και προσπίπτει στην επιφάνεια που χωρίζει το πέτρωμα αυτό από το υπερκείμενο χαλαρό έδαφος.



### Ελαστικό μέσο

Αρμονικό κύμα πλάτους  $A_0$  και περιόδου  $T_0$  διαδίδεται με ταχύτητα  $c_0$  μέσα σε σκληρό θεμελιώδες πέτρωμα, του οποίου η πυκνότητα είναι  $\rho_0$ . Η ταχύτητα ταλάντωσης των υλικών σημείων του πετρώματος θα είναι

$$u = \omega A_0 \sin \omega_0 t,$$

οπότε η μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης θα είναι:

$$u_m = \omega_0 A_0$$

Έστω εμβαδόν  $S$  του μετώπου κύματος, που σε χρόνο  $t$  βάζει σε ταλάντωση μάζα  $m$ .

Η μάζα αυτή θα είναι  $m = \rho_0 S c_0 t$  και στη μονάδα χρόνου θα είναι:  $\dot{m} = \rho_0 S c_0$ .

Η μέγιστη κινητική ενέργεια της μάζας αυτής είναι  $E_0 = m u_m^2 / 2$ . Αφού  $\omega_0 = 2\pi / T_0$ , τότε:  $E_0 = 2 S c_0 \rho_0 \pi^2 \frac{A_0^2}{T_0^2}$

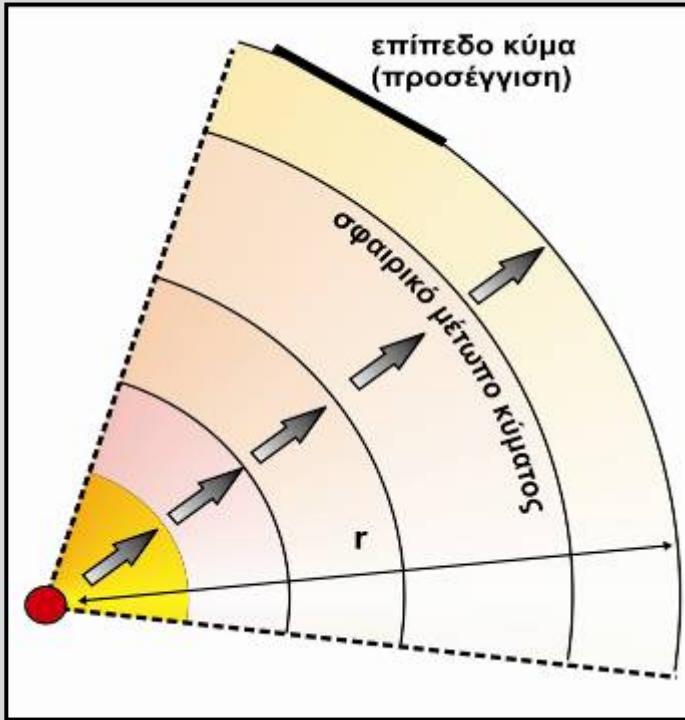
Μόλις το κύμα εισέλθει από τη διαχωριστική επιφάνεια στο χαλαρό έδαφος ( $\rho_1, c_1, c_1 < c_0$ ):  $E_1 = 2 S c_1 \rho_1 \pi^2 \frac{A_1^2}{T_1^2}$

Επειδή ισχύει η αρχή της διατήρησης της ενέργειας ( $E_0 = E_1$ ) και το γεγονός ότι στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων οι περίοδοι πρέπει να είναι ίσες ( $T_0 = T_1$ ), τότε:

$$\frac{A_1}{A_0} = \sqrt{\frac{c_0 \rho_0}{c_1 \rho_1}}$$

$c \cdot \rho =$  κυματική εμπέδηση

Τα πλάτη των μεταθέσεων στα δύο μέσα είναι αντιστρόφως ανάλογα των τετραγωνικών ριζών των κυματικών εμπεδήσεων. Το πλάτος,  $A_1$ , στο χαλαρό στρώμα είναι μεγαλύτερο από το πλάτος  $A_0$  στο σκληρό υπόβαθρο.



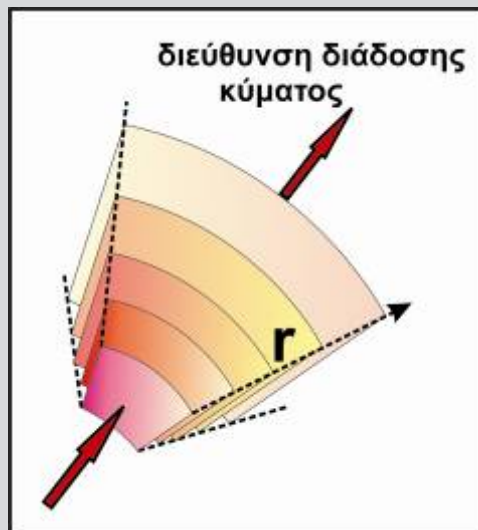
## Ελαστικό μέσο

Η γεωμετρική εξάπλωση (geometrical spreading) των κυμάτων έχει ως συνέπεια την ελάττωση των πλατών των κυμάτων με την απόσταση,  $r$ , από την εστία τους, γιατί όσο απομακρύνονται από την εστία τόσο μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας διαπερνούν τα ίδια κύματα.

Έχει δειχθεί ότι για μικρές, σχετικές, αποστάσεις, τα πλάτη των κυμάτων χώρου στη Γη μεταβάλλονται ανάλογα του  $1/r^2$  (κοντινό πεδίο) ενώ για μεγάλες αποστάσεις ανάλογα του  $1/r$  (μακρινό πεδίο).

Κατά τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων στην επιφάνεια μιας σφαίρας με ακτίνα  $a$ , τα πλάτη ελαττώνονται ανάλογα του  $(a/r\Delta)^{1/2}$ , όπου  $\Delta$  είναι η επικεντρική απόσταση σε ακτίνα.

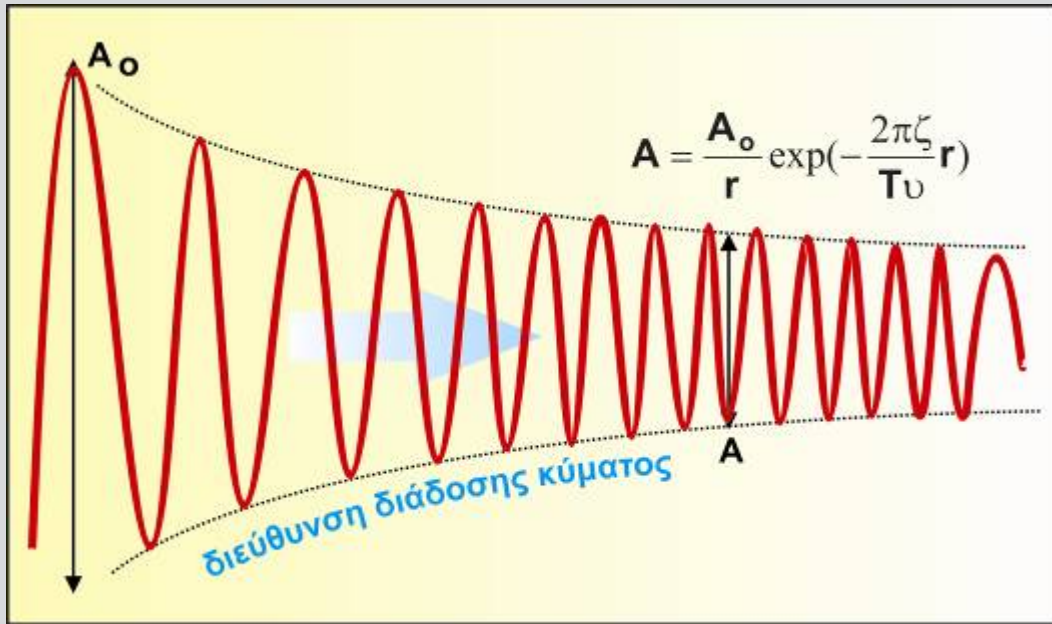
Κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων σε ένα τελείως ελαστικό μέσο δεν υφίστανται αυτά απώλεια της ενέργειάς τους και γι' αυτό τα κύματα εξακολουθούν να υπάρχουν και να διαδίδονται επ' άπειρο στο μέσο αυτό.



Το ίδιο ποσό σεισμικής ενέργειας περνάει από μεγαλύτερη επιφάνεια όσο απομακρύνεται από την εστία.



## Ανελαστικό μέσο



Μεταβολή πλάτων σε ανελαστικό μέσο.

Σε ανελαστικό μέσο, τα πλάτη των κυμάτων **ελαττώνονται** ανάλογα με την ποσότητα  $\exp(-\zeta\omega r/u)$ , όπου  $\zeta$  είναι ο **παράγοντας τριβής** και  $\omega(=2\pi/T)$  είναι η κυκλική συχνότητα του κύματος.

Αυτή η μείωση των πλάτων των κυμάτων ονομάζεται **εγγενής απόσβεση** (intrinsic attenuation) και οφείλεται σε **απώλεια ενέργειας** που προκαλείται από **ανελαστική φυσική διαδικασία** και **εσωτερική τριβή** στο μέσο διάδοσής του.

Αν  $A_0$  είναι το αρχικό πλάτος του κύματος, το πλάτος του,  $A$ , σε **μεγάλη απόσταση**,  $r$ , θα δίνεται από την παρακάτω σχέση, αν ληφθεί υπόψη τόσο η **γεωμετρική εξάπλωση** όσο και την **απόσβεση**:

$$A = \frac{A_0}{r} \exp\left(-\frac{2\pi\zeta}{T\upsilon} r\right)$$

Δηλαδή, όσο **μικρότερη** είναι η **περίοδος** του κύματος, τόσο **εντονότερη** είναι η **απόσβεση** του με την απόσταση.

Συνήθως ο **παράγοντας τριβής** εκφράζεται σε συνάρτηση με τον **παράγοντα ποιότητας**,  $Q$ , με τη σχέση  $\zeta=1/2Q$ . Συνεπώς:

$$A = \frac{A_0}{r} \exp\left(-\frac{\pi}{QT\upsilon} r\right)$$

### Ανελαστικό μέσο

Ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  είναι μια **αδιάστατη** ποσότητα που παριστάνει την **απώλεια** ενέργειας παραμόρφωσης,  $-\Delta E$ , ανά κύκλο. 
$$\frac{1}{Q} = -\frac{\Delta E}{2\pi E}$$

Η ποσότητα  $E$  είναι η **μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης**.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και ως 
$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta A}{\pi A}$$

όπου  $A$  είναι το **πλάτος** του κύματος και  $\Delta A$  η **ελάττωση του πλάτους** ανά ένα κύκλο.

Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι η **απόσβεση αυξάνει** όταν **ελαττώνεται** το  $Q$ .

Ο παράγοντας ποιότητας παριστάνει την **απόσβεση** της κίνησης ενός σημείου κατά τη **διάρκεια** μιας περιόδου ( $Q_t$ ), ή την **απόσβεση** της κίνησης σε **ορισμένο χρόνο** κατά μήκος μιας απόστασης ενός μήκους κύματος ( $Q_s$ ). Οι παραπάνω σχέσεις **ισχύουν** για τιμές του  $Q \gg 1$ .

Το  $Q$  είναι **περίπου ανεξάρτητο** της **συχνότητας** των κυμάτων για **συχνότητες μικρότερες του 1 Hz**, ενώ για **μεγαλύτερες συχνότητες αυξάνει γενικά με τη συχνότητα**.

■ Τα εγκάρσια κύματα αποσβένονται εντονότερα από τα επιμήκη κύματα ( $Q_\alpha > Q_\beta$ ).

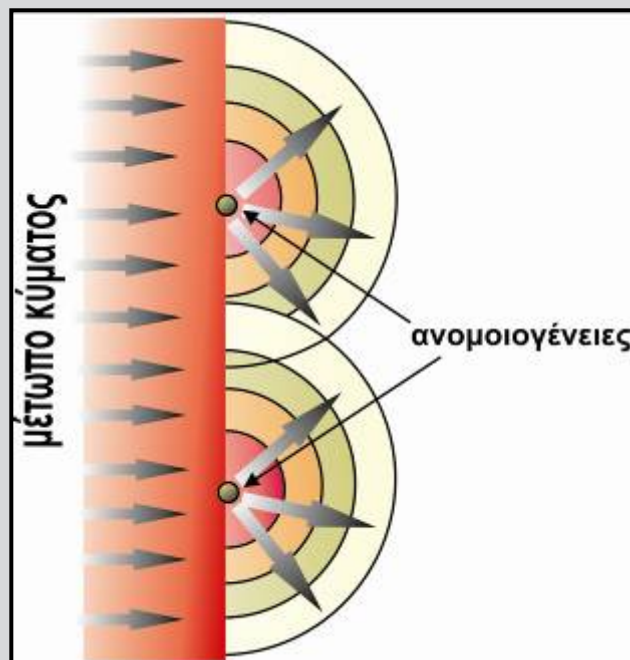
Για το **μεγαλύτερο τμήμα του φλοιού και για τον μανδύα** όπου τα υλικά έχουν πολυκρυσταλλική δομή, ισχύει η ακόλουθη σχέση που συνδέει τους παράγοντες απόσβεσης των P ( $Q_\alpha$ ) και των S ( $Q_\beta$ ) κυμάτων:

$$\frac{1}{Q_\alpha} = \frac{4}{3} \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 \cdot \frac{1}{Q_\beta}$$

Για ένα μέσο Poisson ( $\lambda = \mu$ ,  $\alpha/\beta = \sqrt{3}$ ) έχουμε  $Q_\alpha = 2.25Q_\beta$ , δηλαδή, το  $Q_\alpha$  είναι **υπερδιπλάσιο** του  $Q_\beta$ .

■ Κατά τη **διάδοση των σεισμικών κυμάτων σε ανελαστικό μέσο** υπάρχει **απώλεια ενέργειας παραμόρφωσης**, η οποία μετατρέπεται σε **θερμότητα λόγω της εσωτερικής τριβής** στο μέσο διάδοσης.

## Ανελαστικό και ανομοιογενές μέσο



Σύμφωνα με την αρχή του Huygen κάθε σημείο ανομοιογενούς μέσου κατά τη διάδοση κύματος δρά ως πηγή δευτερογενούς ακτινοβολίας.

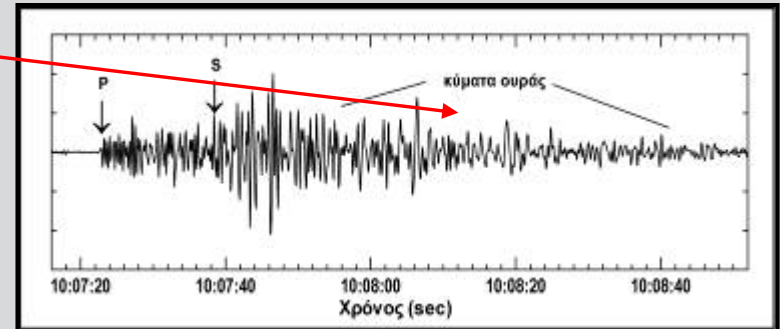
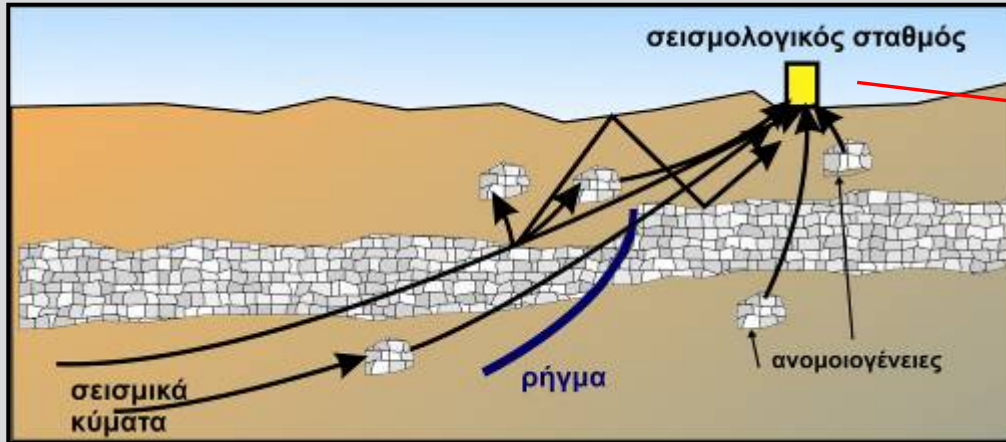
Η μεταβολή των πλατών των κυμάτων που διαδίδονται σε **ανελαστικό** και **ανομοιογενές** μέσο οφείλεται:

- σε **ανελαστική απόσβεση**,
- σε **διασπορά** (scattering), η οποία προκαλείται από μικρής κλίμακας ανομοιογένειες του δρόμου διάδοσης.

Σε τέτοιες μεταβολές πλατών οφείλεται η γένεση των **κυμάτων ουράς** (coda waves), τα οποία εμφανίζονται στα **σεισμογράμματα τοπικών σεισμών μετά** τη φάση **Lg** ή τα **S** κύματα.

Τα κύματα ουράς είναι αποτέλεσμα διαφόρων ανακλάσεων, διαθλάσεων, περιθλάσεων και μετατροπών του είδους του κύματος.

## Ανελαστικό και ανομοιογενές μέσο



Κύματα ουράς σε αναγραφή κοντινού σεισμού στο σεισμολογικό σταθμό ΤΗΕ του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.

Τα κύματα ουράς είναι αποτέλεσμα πολλαπλών αλληλεπιδράσεων του κυματικού πεδίου με τις ανομοιογένειες του μέσου (ανακλάσεις, διαθλάσεις, περιθλάσεις, κλπ.) και μετατροπών του είδους του κύματος.

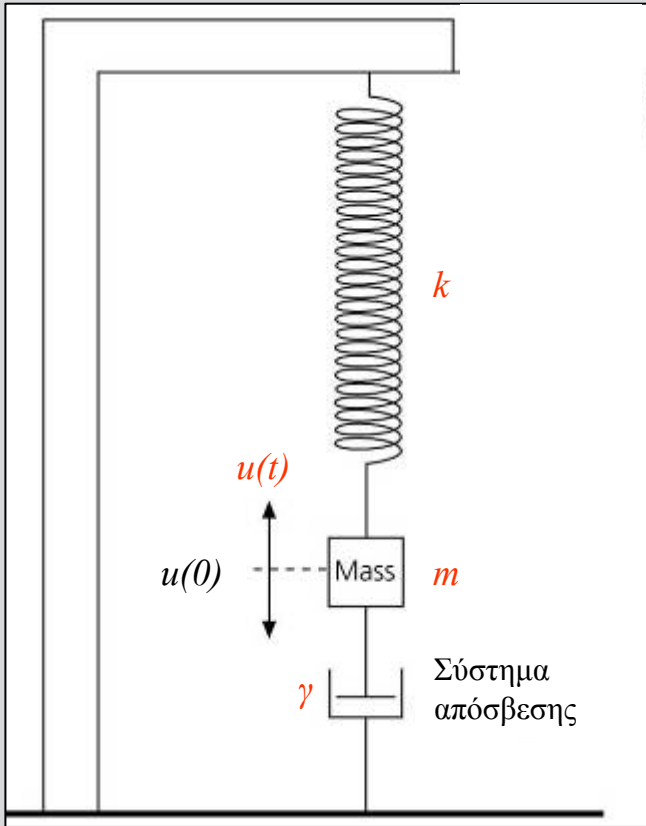
Η μεταβολή (ελάττωση) των πλατών των κυμάτων ουράς οφείλεται τόσο στην **ανελαστικότητα** όσο και στην **ετερογένεια** του μέσου. Για το λόγο αυτό, ο παράγοντας ποιότητας,  $Q_c$ , για τα κύματα ουράς εξαρτάται τόσο από τον παράγοντα εγγενούς απόσβεσης,  $Q_i$ , όσο και από τον παράγοντα διασποράς,  $Q_s$ , και είναι ίσος με:

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_s}$$

■ Ο παράγοντας  $Q_c$  είναι **περίπου ίσος** με τον παράγοντα ποιότητας των εγκαρσίων κυμάτων  $Q_\beta$ , που δείχνει ότι τα κύματα ουράς αποτελούνται κατά κύριο λόγο από εγκάρσια κύματα.

■ Η **διασπορά** των κυμάτων συμβάλλει στην εκθετική ελάττωση των πλατών των κυμάτων, αλλά **δεν συνοδεύεται από απώλεια ενέργειας**, όπως συμβαίνει με την εγγενή απόσβεση όπου ο παράγοντας απόσβεσης,  $Q_i$ , αποτελεί μέτρο της απώλειας αυτής. Έτσι, ο παράγοντας διασποράς,  $Q_s$ , αποτελεί μέτρο της αναδιανομής της ενέργειας των κυμάτων.

## Παράγοντας Ποιότητας Q



Για την κατανόηση της εγγενούς ή εσωτερικής απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων θα εξετάσουμε την κίνηση ενός αρμονικού ταλαντωτή με απόσβεση, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Αν η μάζα  $m$  μετακινηθεί κατά  $u(t)$  τότε η δύναμη επαναφοράς είναι ανάλογη της σταθεράς του ελατηρίου  $k$  επί τη μετατόπιση  $u(t)$ , επομένως σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της μηχανικής

$$F = m \cdot \gamma \quad (1)$$

η διαφορική εξίσωση της κίνησης (στην περίπτωση που δεν υπάρχει απόσβεση) θα είναι

$$m \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + ku(t) = 0 \quad (2)$$

Αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχουν τριβές, η μάζα θα εκτελεί την αρμονική ταλάντωση

$$u(t) = Ae^{i\omega_0 t} + Be^{-i\omega_0 t} \quad (3)$$

( $A, B$  είναι σταθερές) με συχνότητα

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Ένα παράδειγμα της γενικής λύσης (3) είναι η εξίσωση

$$u(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) \quad (5)$$

Η κίνηση της μάζας θα συνεχίζεται στο άπειρο. Στην περίπτωση όμως που υπάρχει σύστημα απόσβεσης της κίνησης το οποίο εξασκεί δύναμη ανάλογη της ταχύτητας της κίνησης και αντίθετης φοράς, τότε η εξίσωση της κίνησης της μάζας του εκκρεμούς (σχέση 2) γίνεται

όπου  $\gamma$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης.

$$m \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \gamma m \frac{du(t)}{dt} + ku(t) = 0 \quad (6)$$

## Παράγοντας Ποιότητας $Q$ (συνέχεια)

Στο σημείο αυτό ορίζουμε τον παράγοντα ποιότητας (quality factor)  $Q$  με τη σχέση

$$Q = \frac{\omega_0}{\gamma} \quad (7)$$

και η διαφορική εξίσωση της κίνησης (σχέση 6) γίνεται

$$\frac{d^2u(t)}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du(t)}{dt} + \omega_0^2 u(t) = 0 \quad (8)$$

Αυτή είναι η διαφορική εξίσωση της κίνησης ενός αρμονικού ταλαντωτή με απόσβεση και μπορεί να λυθεί θεωρώντας ότι η μετάθεση  $u(t)$  είναι το πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού

$$u(t) = A_0 e^{ipt} \quad (9)$$

όπου  $p$  είναι μιγαδικός αριθμός. Με αντικατάσταση της (9) στην (8) προκύπτει

$$(-p^2 + ip \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2) A e^{i(pt)} = 0 \quad (10)$$

Για να ισχύει η (10) για όλες τις τιμές του  $t$  θα πρέπει το πρώτο μέλος της εξίσωσης στην παρένθεση να είναι ίσο με 0, δηλαδή

$$(-p^2 + ip \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2) = 0 \quad (11)$$

Επειδή ο αριθμός  $p$  είναι μιγαδικός θα ισχύει

$$p = a + ib, \quad p^2 = a^2 + 2iab - b^2 \quad (12)$$

και η σχέση (11) γίνεται

$$-a^2 - 2iab + b^2 + ia \frac{\omega_0}{Q} - b \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2 = 0 \quad (13)$$

Αν διαχωρίσουμε την (13) στο πραγματικό και μιγαδικό μέρος και λύσουμε ξεχωριστά για το καθένα τότε καταλήγουμε ότι

για το πραγματικό μέρος:

$$-a^2 + b^2 - b \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2 = 0 \quad (14\alpha)$$

για το μιγαδικό μέρος:

$$-2ab + a \frac{\omega_0}{Q} = 0 \quad (14\beta)$$



## Παράγοντας Ποιότητας Q (συνέχεια)

Από την (14β) προκύπτει ότι

$$b = \frac{\omega_0}{2Q} \quad (15)$$

και από τις (15) και (14α)

$$a^2 = \omega_0^2 \left(1 - \frac{1}{4Q^2}\right) \quad (16)$$

Από τη σχέση (16) ορίζουμε τη συχνότητα  $\omega$ :

$$\omega = a = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \quad (17)$$

και η λύση  $u(t) = A_0 e^{ipt}$  (σχέση 9) γίνεται (αφού  $p = a + ib = \omega + ib$ )

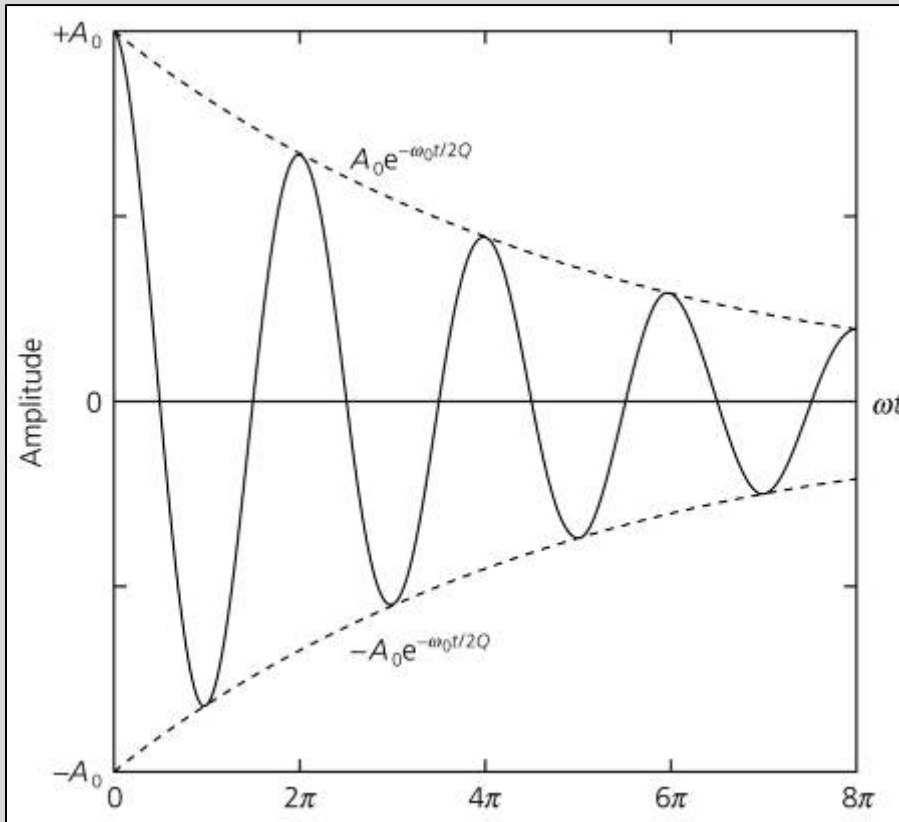
$$u(t) = A_0 e^{i(\omega t + ibt)} = A_0 e^{-bt} e^{i\omega t} \quad (18)$$

Το πραγματικό μέρος της σχέσης (18) είναι η λύση της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την ελεύθερη ταλάντωση με απόσβεση (σχέση 8):

$$u(t) = A_0 e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \cos(\omega t) \quad (19)$$

Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι η κίνηση δεν είναι πλέον μια απλή αρμονική ταλάντωση !!!

## Παράγοντας Ποιότητας $Q$ (συνέχεια)



Αρμονική ταλάντωση με απόσβεση

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (19)

$$u(t) = A_0 e^{\frac{\omega_0 t}{2Q}} \quad (20)$$

εκφράζει την ελάττωση του πλάτους με το χρόνο (περιβάλλουσα του σήματος) και φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα. Ο δεύτερος όρος  $\cos(\omega t)$  εκφράζει την ταλάντωση.

Από τη σχέση (17) προκύπτει επίσης ότι η συχνότητα της αρμονικής ταλάντωσης είναι διαφορετική από αυτήν χωρίς απόσβεση. Όμως αν οι τιμές του  $Q$  είναι μεγάλες ( $Q \gg 1$ ), το οποίο συνήθως συμβαίνει στα πετρώματα της Γης, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι  $\omega \approx \omega_0$ , επειδή ο όρος  $1/4Q^2$  στη σχέση (17) τείνει στη μονάδα.

Αν δεν υπάρχει απόσβεση τότε  $Q = \infty$  ( $1/Q = 0$ ) και η λύση (σχέση 19) είναι αυτή που δίνεται από τη σχέση (5). Όσο αυξάνει η απόσβεση τόσο ελαττώνεται η τιμή του  $Q$ , και φυσικά η ελάττωση του πλάτους (διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα) είναι εντονότερη.

Από τη σχέση (20) προκύπτει επίσης ότι το πλάτος φτάνει στην τιμή  $e^{-1} (= 0.37)$  του αρχικού πλάτους σε χρόνο  $t = 2Q/\omega_0$ , ο οποίος καλείται χρόνος αποκατάστασης ή εκτόνωσης (relaxation time).

## Παράγοντας Ποιότητας $Q$ (συνέχεια)

Η ενέργεια  $E(t)$  ενός συστήματος που ταλαντώνεται είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους της ταλάντωσης και επομένως από τη σχέση (20) προκύπτει ότι

$$E(t) = \frac{1}{2} k A^2(t) = \frac{1}{2} k A_0^2 e^{-\frac{\omega_0 t}{Q}} = E_0 e^{-\frac{\omega_0 t}{Q}} \quad (21)$$

Η απόσβεση των σεισμικών κυμάτων είναι ανάλογη με τον αντίστροφο του παράγοντα ποιότητας  $Q^{-1}$ , και επομένως η ποσότητα  $Q^{-1}$  εκφράζει την απόσβεση, αν και ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  έχει περισσότερες εύχρηστες τιμές (π.χ. 10, 50, 250, κλπ).

Από τη σχέση (20) λογαριθμίζοντας προκύπτει ότι

$$\ln A(t) = \ln A_0 - \frac{\omega_0 t}{2Q} \quad (22)$$

Επομένως, αν χαρτογραφήσουμε το πλάτος  $\ln A(t)$  ενός σειсмоγράμματος σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$ , η κλίση της ευθείας θα είναι ίση με  $-\omega_0/2Q$ . Με αυτήν τη διαδικασία μπορούμε να υπολογίσουμε τον παράγοντα ποιότητας με την προϋπόθεση ότι θα χρησιμοποιούμε τα πλάτη σεισμικών κυμάτων ίδιας συχνότητας  $\omega$  (ή  $\omega_0$ ).

Αν δύο διαδοχικές κορυφές σε χρόνο  $t$  και  $t+T$  (όπου  $T=2\pi/\omega \approx 2\pi/\omega_0$ ) έχουν πλάτη

$$A_1(t_1) = A_0 e^{-\frac{\omega_0 t_1}{2Q}}, \quad A_2(t_1 + T) = A_0 e^{-\frac{\omega_0 (t_1 + T)}{2Q}} \quad (23)$$

Ο λόγος των πλατών αυτών είναι

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{\frac{\pi}{Q}} \Rightarrow Q = \frac{\pi}{\ln(A_1/A_2)} \quad (24)$$

Η σχέση αυτή επίσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του παράγοντα ποιότητας  $Q$ . Στο προηγούμενο σχήμα φαίνεται ότι η δεύτερη κορυφή σε απόσταση  $\omega t = 2\pi$  έχει πλάτος ίσο με  $2/3$  της πρώτης που βρίσκεται σε  $\omega t = 0$ . Επομένως από τη σχέση (23) προκύπτει ότι  $Q = \pi \ln(3/2) = 8$ .

## Παράγοντας Ποιότητας $Q$ (συνέχεια)

Αν θεωρήσουμε την ελάττωση  $\Delta A$  του πλάτους κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, τότε από τη σχέση (24) προκύπτει ότι

$$\Delta A = A(t) - A(t+T) = A(t) - A(t)e^{-\pi/Q} = A(1 - e^{-\pi/Q})$$

Αναπτύσσοντας σε σειρά τον όρο  $e^{-\pi/Q}$  ( $e^z = 1 + z + z^2/2! + \dots$ ) καταλήγουμε στη σχέση

$$\frac{1}{\pi} \frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{Q} \quad (25)$$

Επομένως, η ποσότητα  $Q-1$  εκφράζει το λόγο της ελάττωσης του πλάτους σε διάστημα μιας περιόδου προς το αρχικό πλάτος. Αν αντί του πλάτους θεωρήσουμε την ενέργεια  $E$ , τότε

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{Q} \quad (26)$$

Στην περίπτωση των ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης, αν αντικαταστήσουμε στη σχέση (20) το χρόνο  $t$  με το λόγο της απόστασης  $x$  προς την ταχύτητα  $c$ , θα προκύψει η σχέση

$$A(x) = A_0 e^{-\frac{\omega_0 x}{2cQ}} \quad (27)$$

η οποία εκφράζει την ελάττωση του πλάτους του κύματος όταν αυτό διαδίδεται σε απόσταση  $x$ .