

Φυσική της Λιθόσφαιρας

Διδάσκοντες:

Αναστασία Κυρατζή, Καθηγήτρια Σεισμολογίας

kiratzi@geo.auth.gr

<http://geophysics.geo.auth.gr>

Γεώργιος Καρακαΐσης, καθ. Σεισμολογίας

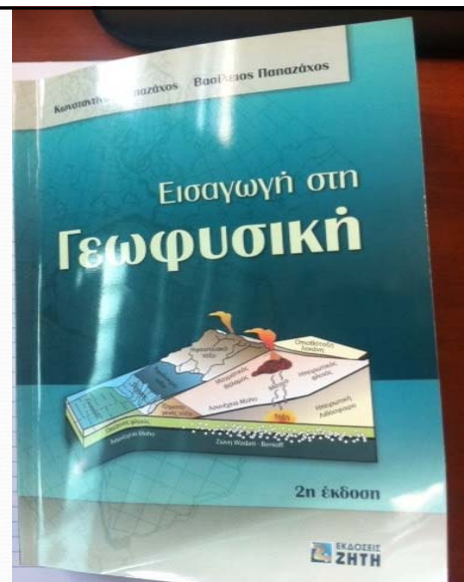
karakais@geo.auth.gr

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

1

Βιβλίο

Εισαγωγή στη Γεωφυσική
Εκδόσεις Ζήτη 2^η έκδοση



2

Υλη του μαθήματος

- Κεφάλαιο 2: Δομή και Σύσταση του Εσωτερικού της Γης
- Κεφάλαιο 3: Γεωδυναμική
- Κεφάλαιο 8: Σεισμικές μέθοδοι καθορισμού της δομής της Γης
- Κεφάλαιο 9: Εφαρμογές Γεωφυσικών Μεθόδων
 - Εφαρμογή 9.1 έως και 9.8
- Ασκήσεις Εργαστηρίου

3

Κεφάλαιο 2: Δομή και σύσταση του εσωτερικού της Γης

Δομή του εσωτερικού της Γης:

κατακόρυφη κατανομή φυσικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν το υλικό της και περιγράφουν τις συνθήκες στις οποίες αυτό βρίσκεται **πυκνότητα, πίεση, ελαστικές σταθερές**

ή

ιδιοτήτων (**αγωγιμότητα, μαγνητική επιδεκτικότητα**, κλπ.)

Σύσταση του εσωτερικού της Γης:

η **ορυκτολογική σύσταση** (χημική σύσταση, κρυσταλλική δομή) και η **πετρολογική σύσταση**

4

- 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.

5

Ανασκόπηση

- **1909** η ασυνέχεια που χωρίζει τον φλοιό από τον μανδύα από το Σέρβο Andrija Mohorovicic και φέρει το όνομα του (ασυνέχεια Moho)
- **1913** ανακαλύφθηκε η ασυνέχεια που χωρίζει τον μανδύα από τον πυρήνα από το Γερμανό Beno Gutenberg (Caltech), η οποία επίσης φέρει το όνομά του.
- **1936** η σεισμολόγος Inge Lehmann (Δανία) δημοσίευσε την εργασία της με τίτλο P'. Ανακάλυψε τον στερεό εσωτερικό πυρήνα της Γης. Η ασυνέχεια εξωτερικού και εσωτερικού πυρήνα φέρει το όνομά της. Το **1906** είχε ανακαλυφτεί από τον Richard Dixon **Oldham**.
- **1940** ο Bullen πρότεινε το πρώτο αξιόπιστο μοντέλο ολόκληρου του εσωτερικού της Γης.

6

Ανασκόπηση

- Σημαντική υπήρξε η συμβολή της μελέτης των **επιφανειακών κυμάτων** Love και Rayleigh στον καθορισμό της δομής των επιφανειακών στρωμάτων της Γης
- και της μελέτης της **ελεύθερης ταλάντωσης της Γης** για τον καθορισμό της δομής του συνόλου του εσωτερικού της Γης.
- Η ύπαρξη των κυμάτων Rayleigh προβλέφθηκε από τον Lord Rayleigh το **1887** και των κυμάτων Love από τον A. Love το **1911**.

7

Ανασκόπηση

- Η πρώτη παρατήρηση **ελεύθερης ταλάντωσης της Γης** έγινε από τον **Benioff** (1958) ο οποίος διέκρινε μία ταλάντωση περιόδου **57 λεπτών** στις αναγραφές επιμηκυνσιομέτρου του σεισμού που έγινε στην Καμτσιάτκα ($M_s=8.2$) στις 4/11/1952.
- Η παρατήρηση αυτή του Benioff δεν έγινε αρχικά αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα.
- Νεότερες, όμως, μελέτες του Benioff και των συνεργατών του το 1961 μετά τον μεγάλο σεισμό της Χιλής (22 Μαΐου 1960, $M=9.5$) απέδειξαν την ορθότητα των ισχυρισμών του.

8

Ανασκόπηση

- Για την εξαγωγή των σχέσεων μεταξύ των **ταχυτήτων των κυμάτων χώρου και των ελαστικών σταθερών**, γίνεται η υπόθεση ότι κατά τη διάδοση των κυμάτων, **οι παραμορφώσεις** του υλικού της Γης είναι **απειροστές**, δηλαδή, ότι οι διαφορικές τάσεις είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις τιμές των ελαστικών σταθερών.
- Όμως, η πίεση στα βαθύτερα στρώματα της Γης είναι πολύ υψηλή (μέχρι 300 GPa) και για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί σχετική **θεωρία υψηλής πίεσης** που **θεωρεί πεπερασμένες τιμές της παραμόρφωσης** και βασίζεται σε καταστατικές εξισώσεις οι οποίες είναι σχέσεις μεταξύ **πίεσης, όγκου και θερμοκρασίας**.
- Οι καταστατικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τιμών των ελαστικών σταθερών σε συνάρτηση με την πίεση στο εσωτερικό της Γης και συνεπώς αποδίδουν πιστότερα τη δομή των βαθύτερων στρωμάτων της Γης.

9

Ανασκόπηση

- Για τη μελέτη των **ιδιοτήτων του υλικού του εσωτερικού της Γης στο εργαστήριο**, απαιτείται η δημιουργία **υψηλών πιέσεων** και **θερμοκρασιών**, αντίστοιχων με αυτές που επικρατούν στον **μανδύα και τον πυρήνα της Γης**. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν δύο σχετικές γενικές μέθοδοι.
 - Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην **ανάπτυξη υψηλών πιέσεων** (~400 GPa) με τη δημιουργία **βραχύχρονων ελαστικών κυμάτων (shock waves)** και έχει εργαστηριακά εφαρμοσθεί σε δείγματα μετάλλων, κυρίως σιδήρου αλλά και σε δείγματα διαφόρων πετρωμάτων.
 - Κατά τη δεύτερη μέθοδο ένα πολύ μικρό δείγμα (π.χ. δουνίτη, σιδήρου) συμπιέζεται μεταξύ δύο επίπεδων **αδαμάντινων κελιών αμονιού (diamond anvil cell)** και έτσι αναπτύσσονται **υψηλές πιέσεις** (μέχρι ~500 GPa) ενώ **παράλληλα τα δείγματα θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες**.

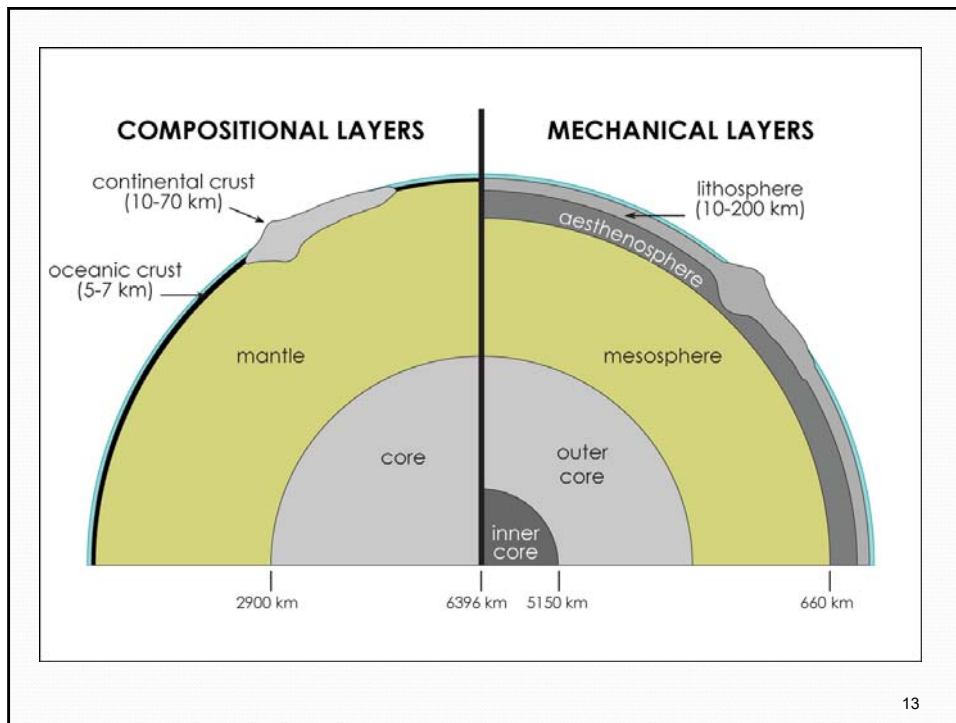
10

Ανασκόπηση

- Οι προσπάθειες μελέτης της **χημικής και ορυκτολογικής-πετρολογικής σύστασης** του υλικού του εσωτερικού της Γης έχουν μακρόχρονη ιστορία και βασίστηκαν σε πληθώρα πληροφοριών που ήταν διαθέσιμες (στοιχεία από **μετεωρίτες**, μοντέλα εξέλιξης της Γης, κλπ.).
- Όμως αυτές απέδωσαν καρπούς κυρίως όταν έγινε γνωστή η γεωφυσική δομή του εσωτερικού της Γης και πραγματοποιήθηκαν σχετικά πειράματα στο εργαστήριο.
- Μεγάλος αριθμός τέτοιων ερευνών έγιναν κατά τον 20^ο αιώνα για τον **καθορισμό της σύστασης του φλοιού, του μανδύα και του πυρήνα**
- Η μελέτη της δομής του εσωτερικού της Γης έλαβε νέες διαστάσεις κατά την τελευταία εικοσαετία λόγω της δημιουργίας νέων **παγκόσμιων δικτύων ψηφιακών σειсмоγράφων**. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι ψηφιακά δεδομένα παρατήρησης επέτρεψαν την εφαρμογή νέων **τομογραφικών μεθόδων, για τον τρισδιάστατο καθορισμό της δομής του εσωτερικού της Γης**.

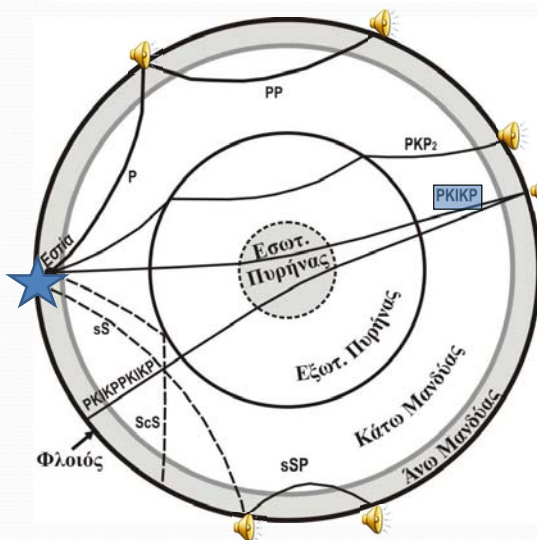
11

2.2 Μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων χώρου με το βάθος και Βασικές ενότητες του εσωτερικού της Γης



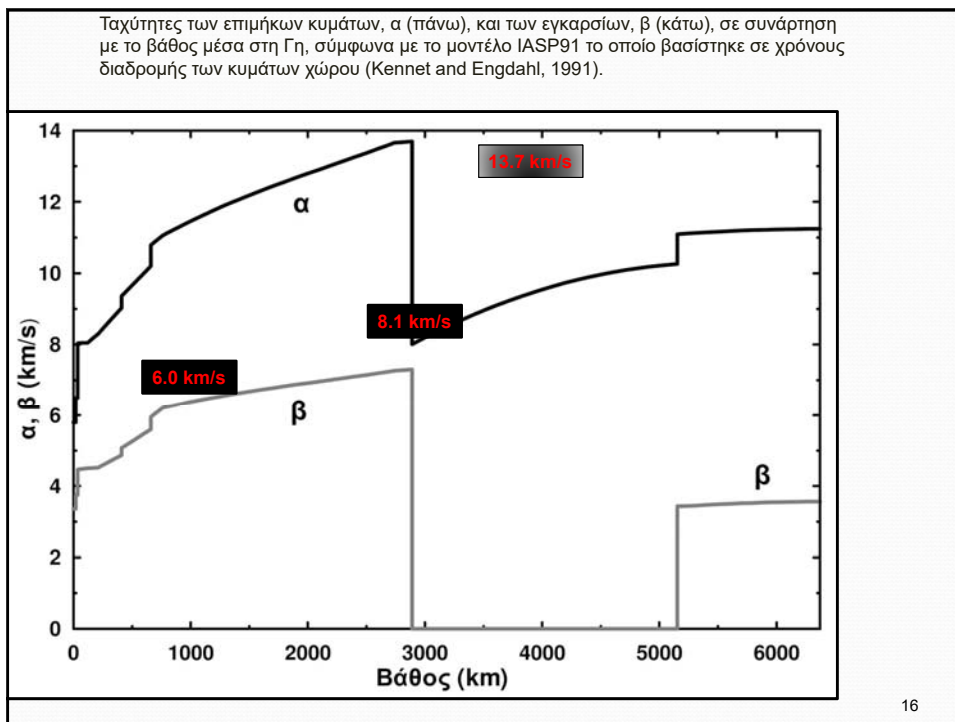
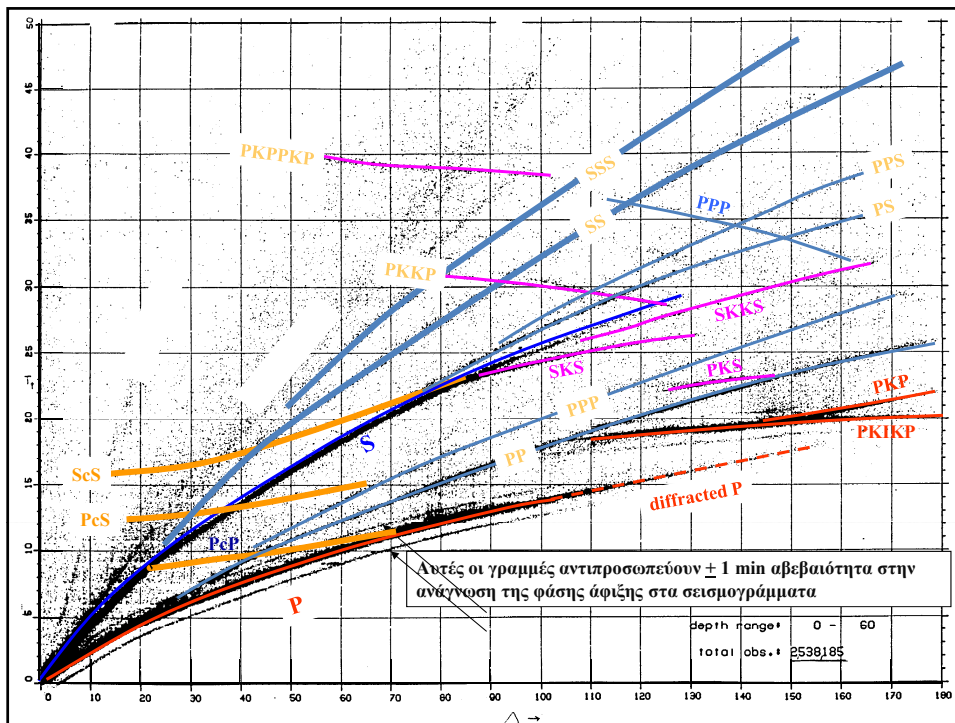
13

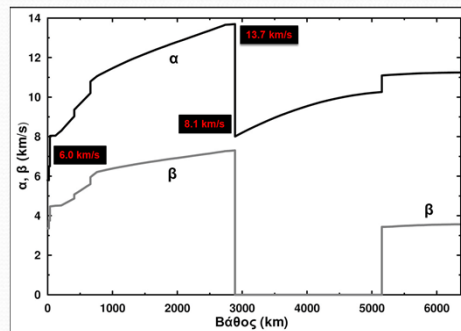
Ασυνέχειες και Σεισμικές ακτίνες



Τα σεισμικά κύματα χώρου (επιμήκη - P- και εγκάρσια -S-) που γεννιούνται σε ορισμένη σεισμική εστία μέσα στη Γη, αναγράφονται από τους σειсмоγράφους που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης, αφού περάσουν από το εσωτερικό της.

Με βάση αυτές τις αναγραφές υπολογίζονται διάφορες παράμετροι, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι **οι χρόνοι διαδρομής των διαφόρων φάσεων των σεισμικών κυμάτων χώρου**. Με βάση τους χρόνους αυτούς εκπονούνται πίνακες ή **καμπύλες χρόνων διαδρομής**, οι οποίες δίνουν τους χρόνους διαδρομής σε συνάρτηση με την επικεντρική απόσταση.

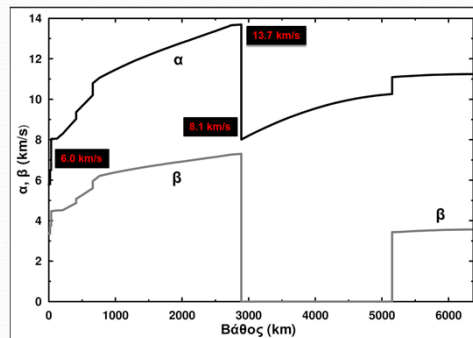




Δύο είναι οι κυριότερες τέτοιες ασυνέχειες όπου έχουμε πολύ σημαντικές αλλαγές των ταχυτήτων και στην ύπαρξη αυτών βασίζεται ο χωρισμός του εσωτερικού της Γης σε στερεό φλοιό, μανδύα και πυρήνα.

Η πρώτη απ' αυτές αποτελεί **το κοινό όριο του φλοιού και του μανδύα**. Αυτή λέγεται **ασυνέχεια Mohorovicic** (ή απλά Moho) και βρίσκεται στις ηπείρους σε ένα μέσο βάθος **35 km** και στους ωκεανούς σε ένα μέσο βάθος **6 km**. Η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων από περίπου 7 km/sec στο φλοιό αμέσως πάνω από την ασυνέχεια αυξάνεται σε περίπου 8 km/sec στο μανδύα αμέσως κάτω από την ασυνέχεια.

17



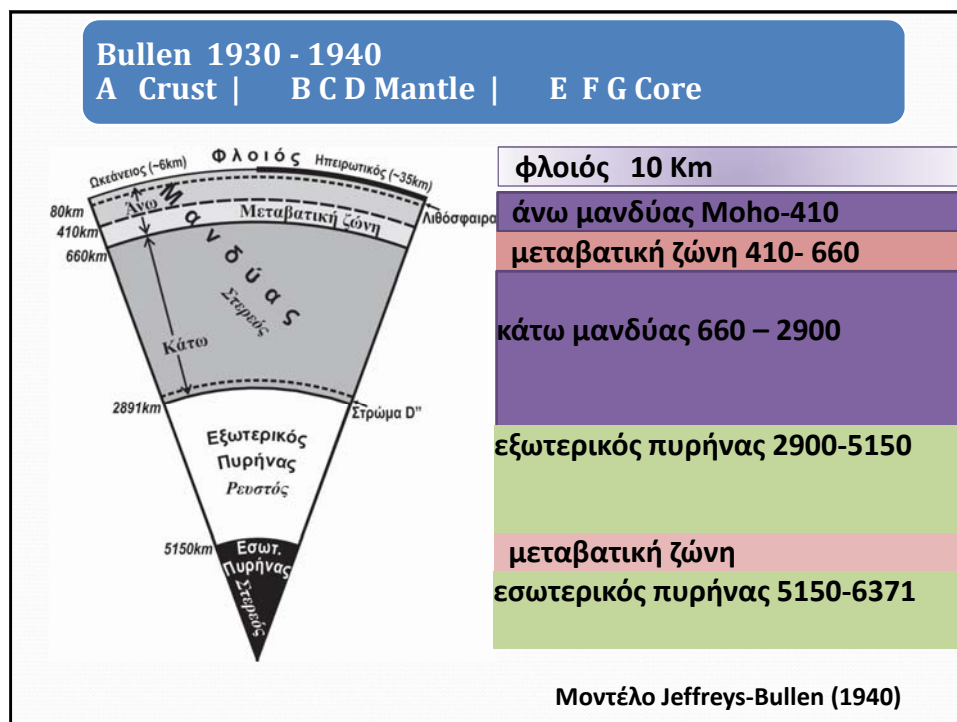
Η δεύτερη από τις δύο κύριες ασυνέχειες αποτελεί κοινό όριο του μανδύα και του πυρήνα, **λέγεται ασυνέχεια Gutenberg και βρίσκεται σε ένα μέσο βάθος 2900 km**. Η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων από 13.7 km/sec στο μανδύα αμέσως πάνω από την ασυνέχεια ελαττώνεται απότομα σε 8.1 km/sec στον πυρήνα αμέσως κάτω από την ασυνέχεια. Αντίστοιχα, η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων από 7.3 km/sec στον πυθμένα του μανδύα μηδενίζεται αμέσως κάτω από την ασυνέχεια Gutenberg.

Οι δύο αυτές ασυνέχειες (**Mohorovicic, Gutenberg**), των οποίων η ύπαρξη επιβεβαιώθηκε από την εμφάνιση στα σειсмоγράμματα φάσεων κυμάτων ανάκλασης (PmP, PcP, κλπ.), θεωρούνται 'ασυνέχειες πρώτης τάξης'.

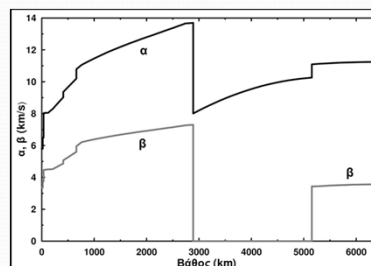
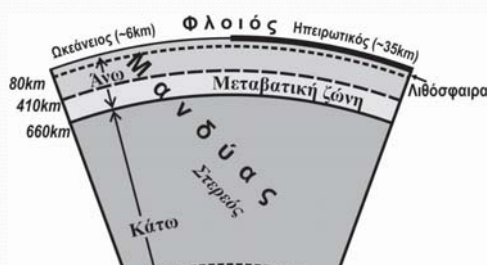
18

- Στο εσωτερικό της Γης υπάρχουν και αρκετές ασυνέχειες **δεύτερης τάξης**, όπου οι μεταβολές των ταχυτήτων είναι σχετικά μικρότερες αλλά είναι σημαντικές για την κατανόηση της δομής και σύστασης του εσωτερικού της Γης.
- Με βάση τις κυριότερες ασυνέχειες, ο Bullen πρότεινε το 1930 ένα μοντέλο του εσωτερικού της Γης το οποίο περιλαμβάνει επτά ομόκεντρα (σφαιρικά) στρώματα και ονόμασε με το γράμμα A το φλοιό της Γης, με B, C, D τρία στρώματα του μανδύα και με E, F, G τρία στρώματα του πυρήνα. Ο χωρισμός αυτός ισχύει σήμερα σε γενικές μόνο γραμμές.

19

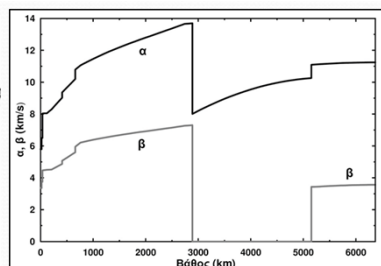
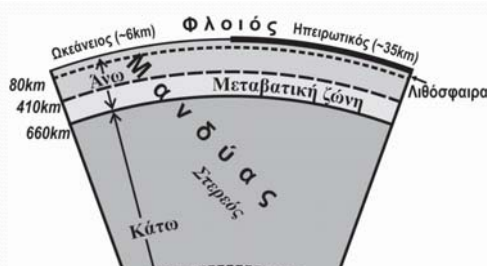


ΦΛΟΙΟΣ: Ηπειρωτικός - ωκεάνιος φλοιός



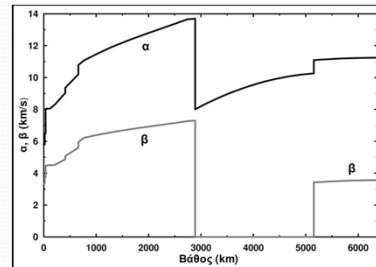
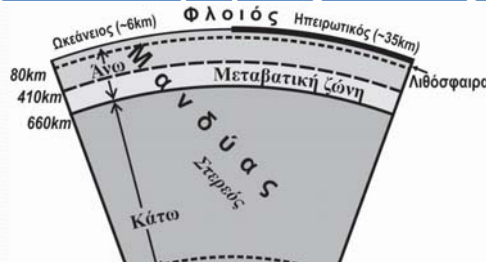
- Ο φλοιός της Γης (στρώμα Α κατά Bullen) διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους
- τον **ωκεάνιο φλοιό** του οποίου το μέσο πάχος είναι 6 km
- και τον **ηπειρωτικό φλοιό** του οποίου το μέσο πάχος είναι περίπου 35 km.
- Παλαιότερα υπήρχε η αντίληψη ότι ο ηπειρωτικός φλοιός χωρίζεται σε δύο στρώματα, τον **ανώτερο φλοιό** (συντά αναφερόμενο ως 'γρανιτικό' στρώμα) και τον **κατώτερο φλοιό** (συντά αναφερόμενο ως 'βασαλτικό' στρώμα) ενώ η ενδιάμεση ασυνέχεια είναι γνωστή ως **ασυνέχεια Conrad**.

Λιθόσφαιρα



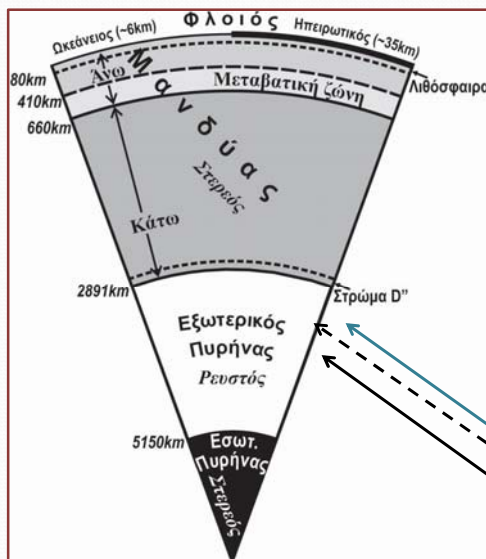
- Ο φλοιός μαζί με το ανώτατο μέρος του άνω μανδύα σχηματίζει ένα **δύσκαμπτο στρώμα 80km** που ονομάζεται **λιθόσφαιρα**. Μέσα στη λιθόσφαιρα η ταχύτητα τόσο των επιμήκων όσο και των εγκαρσίων κυμάτων **αυξάνει γενικά με το βάθος** τόσο μέσα στο φλοιό, όσο και κατά τη μετάβαση από το φλοιό στο μανδύα.
- Στο **κατώτερο τμήμα της λιθόσφαιρας** (περίπου **40-80km**) η ταχύτητα των κυμάτων χώρου παραμένει σταθερή ή παρουσιάζει πολύ μικρή αύξηση μέχρι και το τέλος της λιθόσφαιρας. Το τμήμα αυτό αναφέρεται συχνά και ως **σεισμικό κάλυμμα (seismic LID)** και **αντιστοιχεί στο επιφανειακό οριακό θερμικό στρώμα της Γης (thermal boundary layer)**.

Ασθενόσφαιρικός Δίαυλος 80 – 220 km



- Στο βάθος **80 km - 220 km** η ταχύτητα των επιμήκων και των εγκάρσιων κυμάτων **ελαττώνεται** απότομα μέσα στο μανδύα
- Το στρώμα (80-220 km) μικρής ταχύτητας ονομάζεται **ασθενόσφαιρικός διάυλος** ή κύριο στρώμα χαμηλής ταχύτητας (**Low Velocity Zone-LVZ**) της Γης.
- Έχει τεράστια γεωδυναμική σημασία, γιατί εξηγεί τη δυνατότητα κίνησης της δύσκαμπτης λιθόσφαιρας πάνω στην ασθενόσφαιρα.
- Η ύπαρξη αυτού του στρώματος οφείλεται στο γεγονός ότι στα βάθη αυτά (80-220 km) η θερμοκρασία **πλησιάζει ή και τοπικά ξεπερνά το σημείο τήξης του μανδύα**, «αδυνατίζοντας» τους ατομικούς και μοριακούς δεσμούς και μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τα μέτρα ελαστικότητας και τις αντίστοιχες σεισμικές ταχύτητες.
- Η μείωση αυτή **μειώνει έντονα και το ιξώδες** και επιτρέπει τη συμπεριφορά του στερεού υλικού ως ρευστό

CRUST - LITHOSPHERE - ASTHENOSPHERE



Ανώτερος (γρανιτικός)
Κατώτερος (βασαλτικός) **Conard**

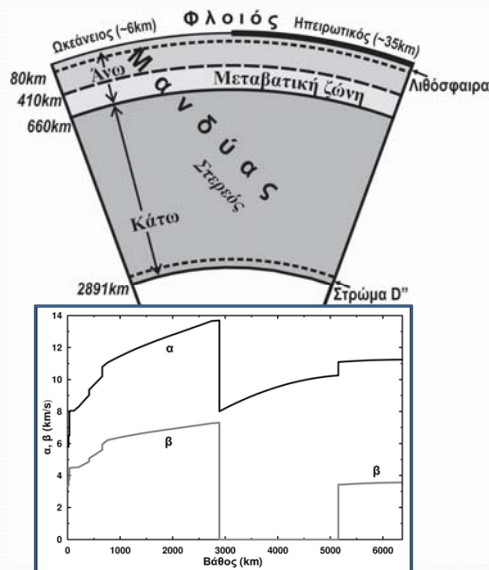
Λιθόσφαιρα 80 km (φλοιός + τμήμα άνω μανδύα)
40-80km: σεισμικό κάλυμμα (seismic LID)
(επιφανειακό θερμικό κάλυμμα, TBL (Thermal boundary layer))

(80-220 km): Ασθενόσφαιρα ή ασθενόσφαιρικός διάυλος ή LVZ
 V_s : 4.7 km/sec 4.3 km/sec

Ωκεάνια λιθόσφαιρα: συχνά < 50 km
Ηπειρωτική λιθόσφαιρα: κάποτε >200 km

Καναδική ασπίδα
Άλπεις
Ειρηνικός

Μανδύας (Moho - 2900 km) - άνω Μανδύας [Moho-660 km]



Ο μανδύας χωρίζεται στον άνω και στον κάτω μανδύα.

Ο άνω μανδύας αρχίζει από τον πυθμένα του φλοιού (ασυνέχεια Moho) και φτάνει μέχρι το βάθος των 660km

- 410km πρώτη σημαντική παγκόσμια ασυνέχεια του άνω μανδύα, με έντονη αύξηση της ταχύτητας των P και S κυμάτων.

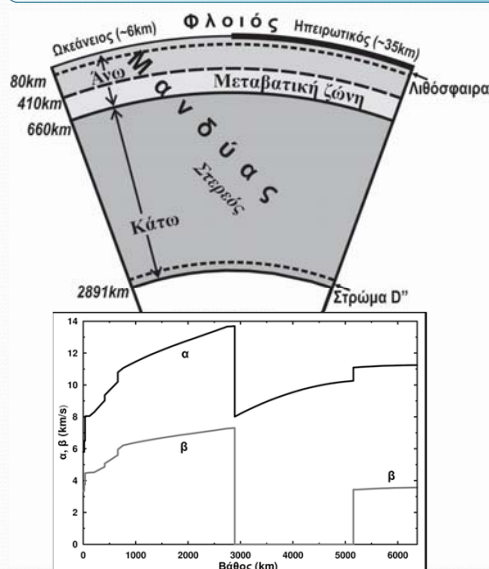
- 660km μία δεύτερη σημαντική παγκόσμια ασυνέχεια του άνω μανδύα, με έντονη αύξηση της ταχύτητας των P και S κυμάτων.

Bullen B = Moho – ασυνέχεια 410km

Bullen C = 410 km – 660 km μεταβατική ζώνη - ιδιαίτερη γεωδυναμική σημασία

25

Κάτω Μανδύας (660 - 2900 km)



- Ο **κάτω μανδύας**, ο οποίος ονομάστηκε από τον Bullen στρώμα D, αρχίζει από την ασυνέχεια των 660km και φτάνει μέχρι τον πυθμένα του μανδύα, δηλαδή μέχρι την ασυνέχεια Gutenberg (~2900km).

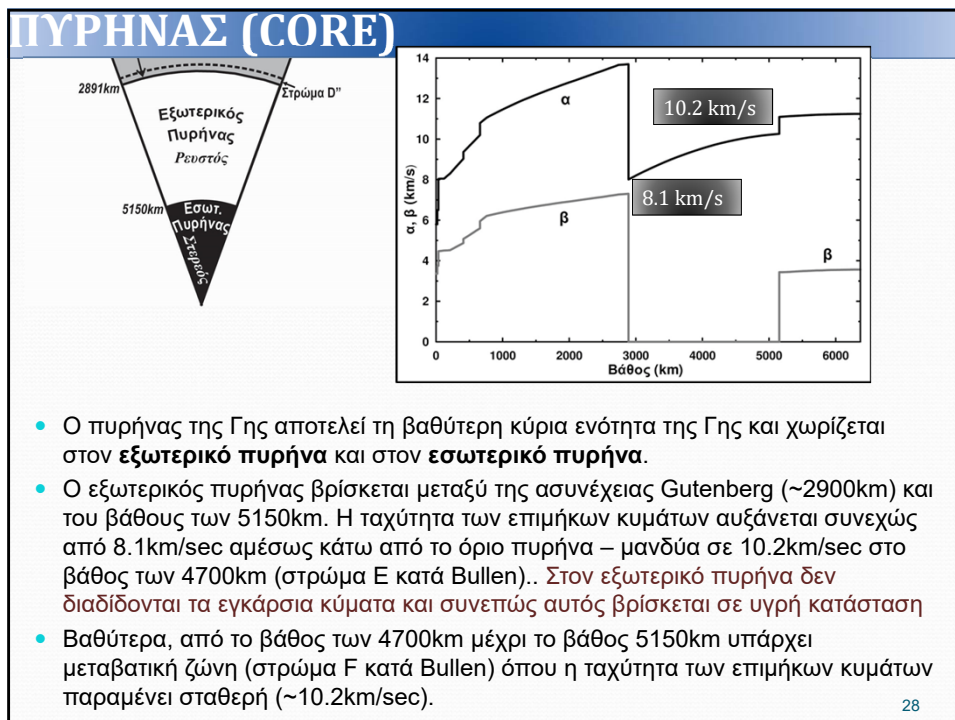
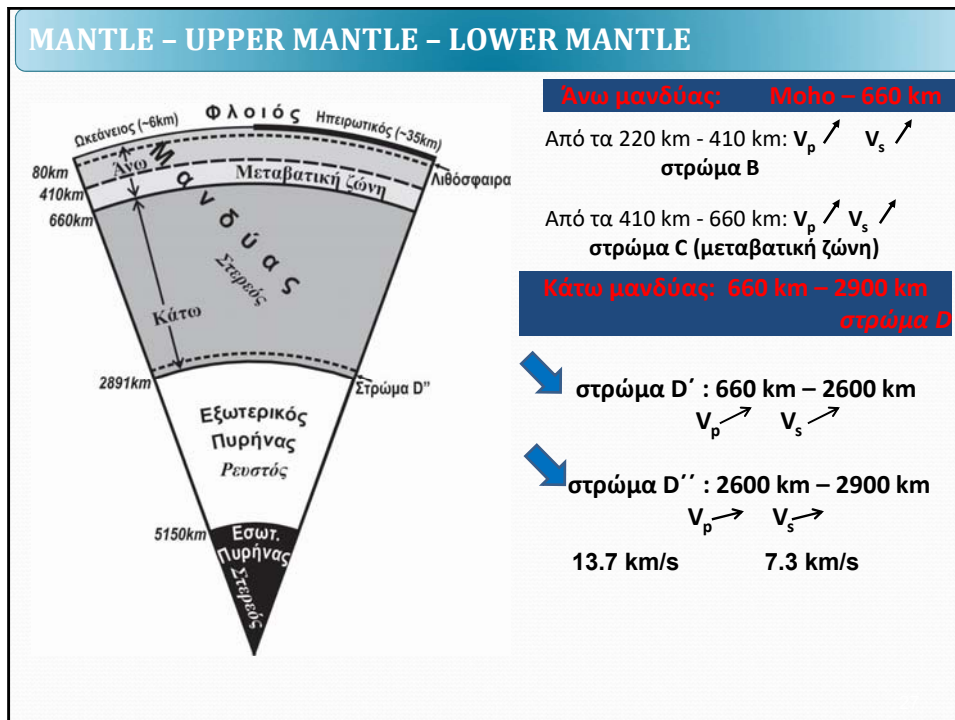
- Οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου αυξάνονται συνεχώς με το βάθος στον κάτω μανδύα και στον πυθμένα του η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων φθάνει την τιμή των 13.7km/sec και των εγκάρσιων κυμάτων την τιμή 7.3km/sec, οι οποίες είναι οι μεγαλύτερες τιμές ταχυτήτων τις οποίες αποκτούν τα κύματα αυτά μέσα στη Γη.

- Ο κάτω μανδύας (στρώμα D) χωρίζεται σε δύο στρώματα, το D' και D''.

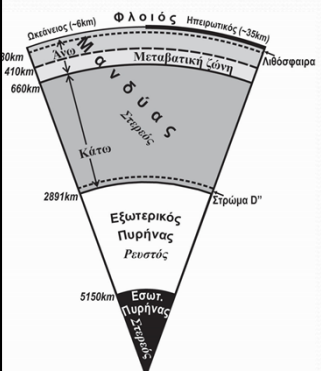
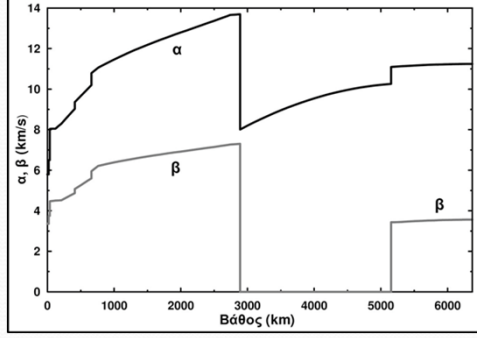
- Στο D', που βρίσκεται μεταξύ **660km και 2600km**, η ταχύτητα των κυμάτων χώρου αυξάνεται συνεχώς με το βάθος αλλά με μέτριο ρυθμό.

- **CMB** Το στρώμα D'' το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τον πυρήνα έχει πάχος περίπου 300km (**2600-2900km**) και ο τρόπος μεταβολής της ταχύτητας των κυμάτων χώρου φαίνεται ότι είναι πολύπλοκος.

26



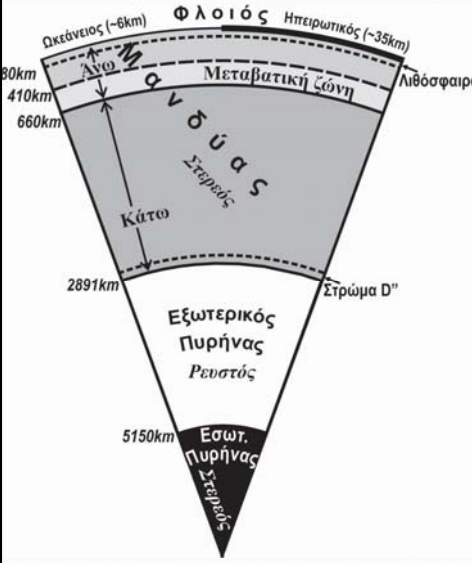
ΠΥΡΗΝΑΣ - inner core

- Ο **εσωτερικός πυρήνας** (στρώμα G κατά Bullen) αρχίζει από το βάθος των 5150km και φθάνει μέχρι το κέντρο της Γης που βρίσκεται στο βάθος των 6371km.
- Στο όριο μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού πυρήνα η ταχύτητα των P κυμάτων αυξάνει απότομα από 10.2km/sec σε 11.0km/sec και η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων από μηδέν γίνεται 3.5km/sec.
- Οι ταχύτητες αυτές διατηρούνται σχεδόν σταθερές σε όλο τον εσωτερικό πυρήνα, γεγονός που σημαίνει ότι το υλικό του εσωτερικού πυρήνα παραμένει σε στερεά κατάσταση.

29

Πυρήνας E-F-G



Εξωτερικός πυρήνας: 2900 km - 5150 km

2900-4700 km: V_p 8.1 → 10.2 km/sec
στρώμα E

4700 km - 5150 km: $V_p \sim 10.2$ km/sec
στρώμα F (μεταβατική ζώνη)

Όχι S κύματα - Υγρή κατάσταση

Εσωτερικός πυρήνας: 5150 km - 6371 km

στρώμα G

V_p : 10.2 → 11 km/sec
 V_s : 0.0 → 3.5 km/sec

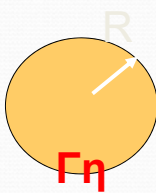
2.3 Πυκνότητα στο εσωτερικό της Γης

$$\rho = 5.52 \text{ gr/cm}^3$$

31

Πυκνότητα στο εσωτερικό της Γης

1. Από το νόμο της βαρύτητας



$$F = G \frac{M}{R^2} = G \frac{\rho_m V}{R^2} = G \frac{\rho_m \frac{4}{3} \pi R^3}{R^2}$$

$$\rho_m = \frac{3g}{4\pi R G} = 5.52 \text{ gr/cm}^3$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

- ΦΛΟΙΟΣ = 2.0 - 3.0 gr/cm³
- ΜΑΝΔΥΑΣ = 3.3 - 5.5 gr/cm³
- ΠΥΡΗΝΑΣ = 9.5 - 15.0 gr/cm³

- Η πυκνότητα των πετρωμάτων κοντά στην επιφάνεια της Γης είναι **2.7gr/cm³** περίπου, δηλαδή, σημαντικά μικρότερη από τη μέση πυκνότητα της Γης.
- Αυτό δείχνει ότι η **πυκνότητα του εσωτερικού της Γης είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα των επιφανειακών πετρωμάτων της.**

32

2. Πυκνότητα από τη Μάζα της Γης

$$\rho_m = \frac{M}{V}$$

$$g = \frac{GM}{R^2} \rightarrow M = \frac{g R^2}{G} = \frac{9.8(6371 \times 10^3)^2}{6.67 \times 10^{-11}} = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$\rho_m = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{5.97 \times 10^{24} \times 10^3 \text{ gr}}{1.08 \times 10^{12} \times (10^5)^3 \text{ cm}^3} = 5.52 \text{ gr/cm}^3$$

$$M = 4\pi \int_{r=0}^{r=R} \rho(r) r^2 dr$$

Μάζα = ολοκλήρωμα
της πυκνότητας
στον όγκο

Μάζα που περικλείεται
σε σφαίρα ακτίνας
R

Κυρατζή Α. "Φυσική της Λιθόσφαιρας"

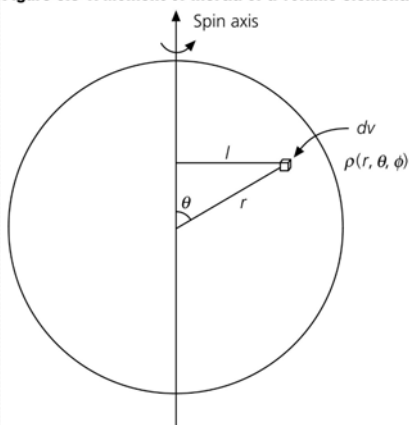
33

3. Πυκνότητα από τη ροπή αδρανείας της Γης ως προς τον άξονα περιστροφής της

$$I = kMR^2$$

$k = \text{inertia constant}$

Figure 3.8-1: Moment of inertia of a volume element.



- Αν η Γη ήταν ομογενής, τότε παντού η $\rho = \rho_m$ και η σταθερά αδρανείας ομογενούς σφαίρας

$$k = I / MR^2 = 2 / 5 = 0.4$$

- Πραγματική σταθερά αδρανείας Γης

$$k = I / MR^2 = 0.3309$$

- Αυτό δείχνει μεγαλύτερη συγκέντρωση υλικού προς το κέντρο της Γης

Κυρατζή Α. "Φυσική της Λιθόσφαιρας"

34

Πυκνότητα - μοντέλα

- Η πυκνότητα των πετρωμάτων του εσωτερικού της Γης εξαρτάται από την **πίεση, τη θερμοκρασία και την ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων αυτών**. Ο προσδιορισμός της πυκνότητας **βασίζεται σε σχέσεις μεταξύ αυτής και των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χώρου**, καθώς και σε διάφορες άλλες γεωφυσικές παρατηρήσεις που θέτουν περιορισμούς στις αναμενόμενες τιμές της πυκνότητας.
- Οι παρατηρήσεις αυτές αφορούν τις τιμές της μέσης πυκνότητας, της πυκνότητας των επιφανειακών πετρωμάτων και της ροπής αδράνειας, καθώς και την ελεύθερη ταλάντωση της Γης, την ισοστασία, την κλόνηση του άξονα της Γης, την επίδραση της Γης πάνω στη Σελήνη, την τιμή της έντασης του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης, κλπ.
- Προτάθηκαν, έτσι, διάφορα **μοντέλα του εσωτερικού της Γης**, στα οποία η **κατανομή της πυκνότητας είναι τέτοια, ώστε να συμφωνεί με τις τιμές των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων που προσδιορίστηκαν, με τη μέση πυκνότητα της Γης και την πυκνότητα των επιφανειακών πετρωμάτων της, με τη ροπή αδράνειας που προσδιορίστηκε, με τις τιμές των περιόδων της ελεύθερης ταλάντωσης της Γης που μετρήθηκαν, με τη περίοδο της ελεύθερης κλόνησης του άξονα της Γης, κλπ.**

35

Πυκνότητα και ταχύτητες ελαστικών κυμάτων χώρου

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα α των επιμήκων κυμάτων P και η ταχύτητα β των εγκάρσιων κυμάτων S συνδέονται με την πυκνότητα, ρ , και τις ελαστικές σταθερές του Lamé λ , μ με τις σχέσεις:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

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

ρ = η πυκνότητα (Μάζα / Όγκος)

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

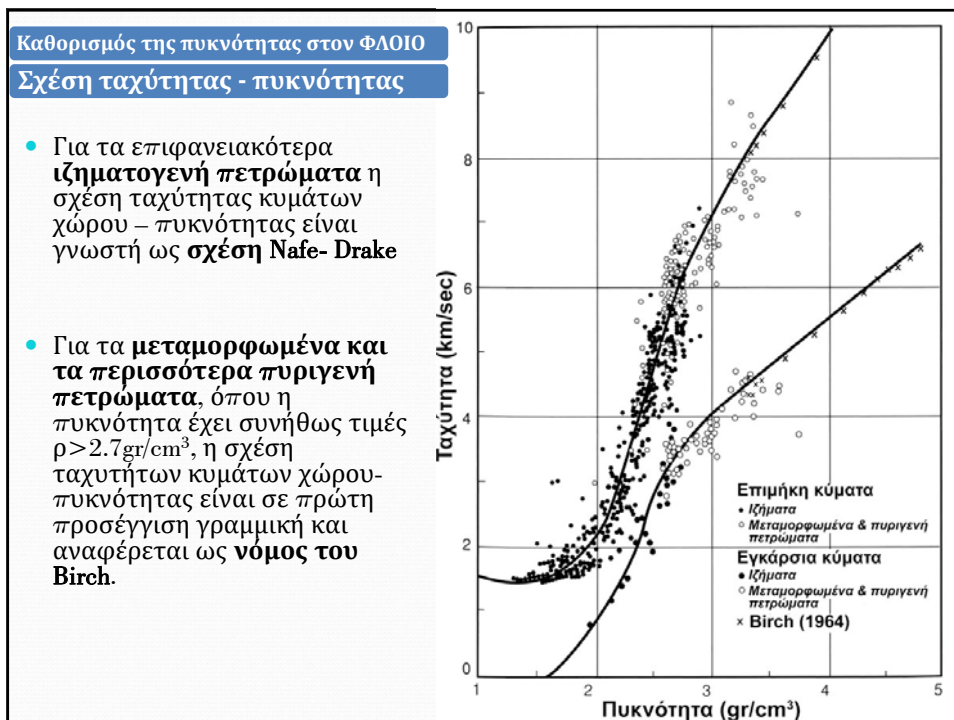
Οι δύο αυτές σχέσεις δεν επιτρέπουν τον υπολογισμό της πυκνότητας μέσα στη Γη, γιατί είναι άγνωστες, εκτός από την πυκνότητα, και οι ελαστικές σταθερές λ και μ .

36

Καθορισμός της πυκνότητας στον φλοιό

- Ο καθορισμός της πυκνότητας μέσα στο φλοιό και αμέσως κάτω απ' αυτόν βασίζεται σε:
- **άμεσες μετρήσεις δειγμάτων** (επιφανειακών ή από γεωτρήσεις),
- **σε σχέσεις μεταξύ της πυκνότητας και της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων που προσδιορίστηκαν εργαστηριακά** καθώς και
- **σε ερμηνεία των μετρήσεων της έντασης του πεδίου βαρύτητας σε συνάρτηση με την πυκνότητα.**

37



Σχέσεις υπολογισμού, ρ για το φλοιό της Γης

- Έτσι, για το φλοιό της Γης και για μία ενδεικτική μέση πίεση 6 bar που αντιστοιχεί σε βάθος 18km ισχύουν σε πρώτη προσέγγιση οι σχέσεις :

$$\alpha = 2.27\rho + 0.25$$

$$\beta = 1.17\rho + 0.42$$

- όπου α και β (σε km/sec) είναι οι ταχύτητες των επιμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, αντίστοιχα, και ρ (σε gr/cm³) είναι η πυκνότητα του μέσου.
- Στον ανώτερο ηπειρωτικό φλοιό όπου η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων είναι $\alpha=6.1$ km/sec η πυκνότητα είναι περίπου 2.6 gr/cm³, τιμή που είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις απ' ευθείας μετρήσεις της μέσης πυκνότητας στο στρώμα αυτό.
- Αμέσως κάτω από το φλοιό, στον ανώτατο μανδύα η μέση ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων είναι $\alpha=8.0$ km/sec και η πυκνότητα είναι 3.4 gr/cm³.

39

Υπολογισμός της πυκνότητας σε συνάρτηση με το βάθος στον μανδύα και τον πυρήνα της Γης

Υποθέτουμε ότι ισχύει το
Μοντέλο της
αυτοσυμπίεσης

Τα στρώματα του μανδύα
και του πυρήνα είναι
ομογενή και βρίσκονται
σε κατάσταση
υδροστατικής ισορροπίας

έτσι η κατακόρυφη βαθμίδα της
υδροστατικής πίεσης dP/dr δίνεται από τον
νόμο του Pascal $\frac{dP}{dr} = -g\rho$

Pascal's law: A change in pressure at any point in an enclosed fluid at rest is transmitted undiminished to all points in the fluid.

40

Μεταβολή της πυκνότητας με βάθος (I)

$$\frac{dP}{dr} = -g\rho \quad \text{και} \quad g = G \frac{m}{r^2}$$

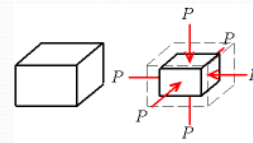
$$\text{ή} \quad \rho \alpha \quad \frac{dP}{dr} = -G \frac{m}{r^2} \rho \quad \text{ρυθμός κατακόρυφης μεταβολής της πίεσης}$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad d\theta = \frac{dV}{V}$$

$$d\rho = -\left(\frac{m}{V^2}\right)dV = -\rho d\theta$$

$$K = -V \frac{dP}{dV} = \rho \frac{dP}{d\rho}$$

$$\frac{d\rho}{dr} = \frac{d\rho}{dP} \frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho^2}{Kr^2}$$



41

Μεταβολή της πυκνότητας με βάθος (II)

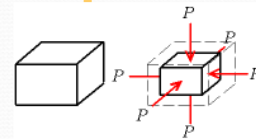
$$K = \rho\left(\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2\right) = \rho\Phi$$

$$\frac{d\rho}{dr} = \frac{d\rho}{dP} \frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho^2}{Kr^2}$$

$$\Phi = \left(\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2\right) \quad \text{σεισμική παράμετρος}$$

$$V_\Phi = \Phi^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2} \quad \text{bulk velocity}$$

$$\frac{d\rho}{dr}(r) = \frac{-Gm\rho}{r^2\left(\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2\right)}(r) = -\frac{Gm\rho}{r^2\Phi}$$



42

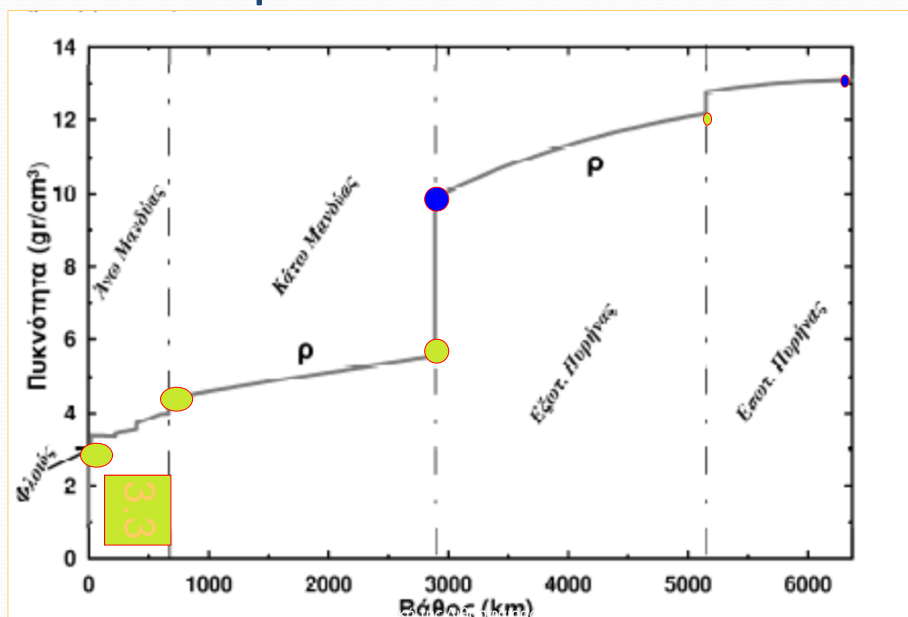
Σχέση Adams-Williamson

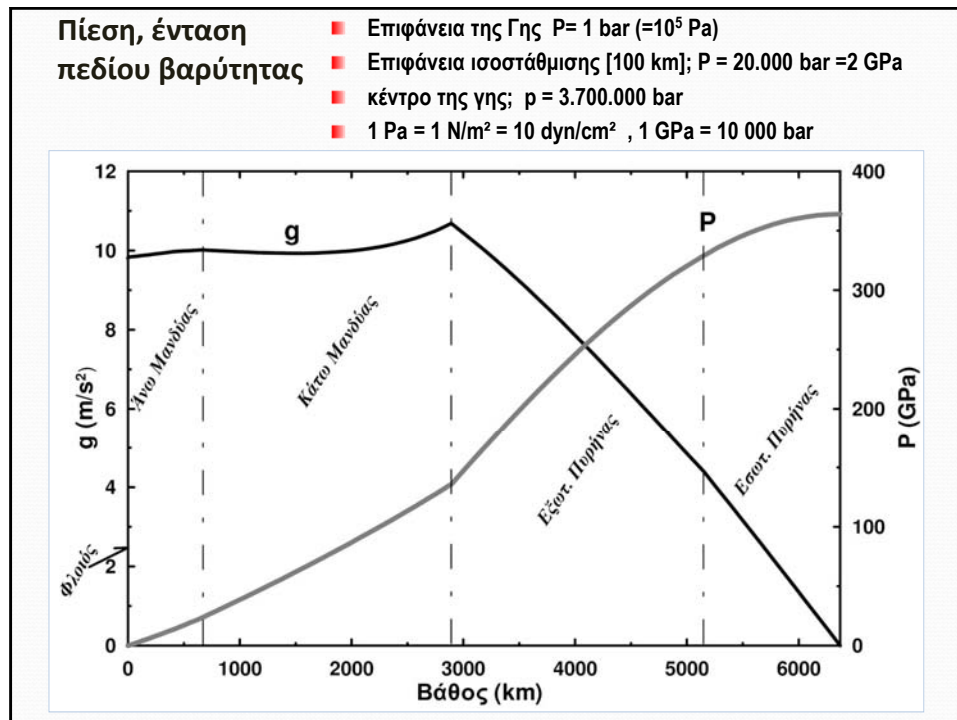
$$\frac{d\rho}{dr} = \frac{-Gm\rho}{r^2(\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2)} = -\frac{Gm\rho}{r^2\Phi}$$

- Δίνει τη βαθμίδα μετ της ρ σε ένα σημείο που απέχει απόσταση r όταν οι ποσότητες στο δεξί μέλος είναι γνωστές
- Ξεκινάμε από γνωστή τιμή της πυκνότητας στο πάνω τμήμα του μανδύα = 3,3 gr/cm³.

Κυρατζή Α. "Φυσική της Λιθόσφαιρας"

Πυκνότητα





2.5 Τιμές των Ελαστικών Σταθερών στο Εσωτερικό της Γης

- λ, μ σταθερές του Lamé
- K μέτρο κυβικής διαστολής
- E μέτρο του Young
- σ λόγος του Poisson

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

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

ρ = η πυκνότητα (Μάζα / Όγκος)

Σχέσεις των ελαστικών σταθερών με τις ταχύτητες των κυμάτων χώρου

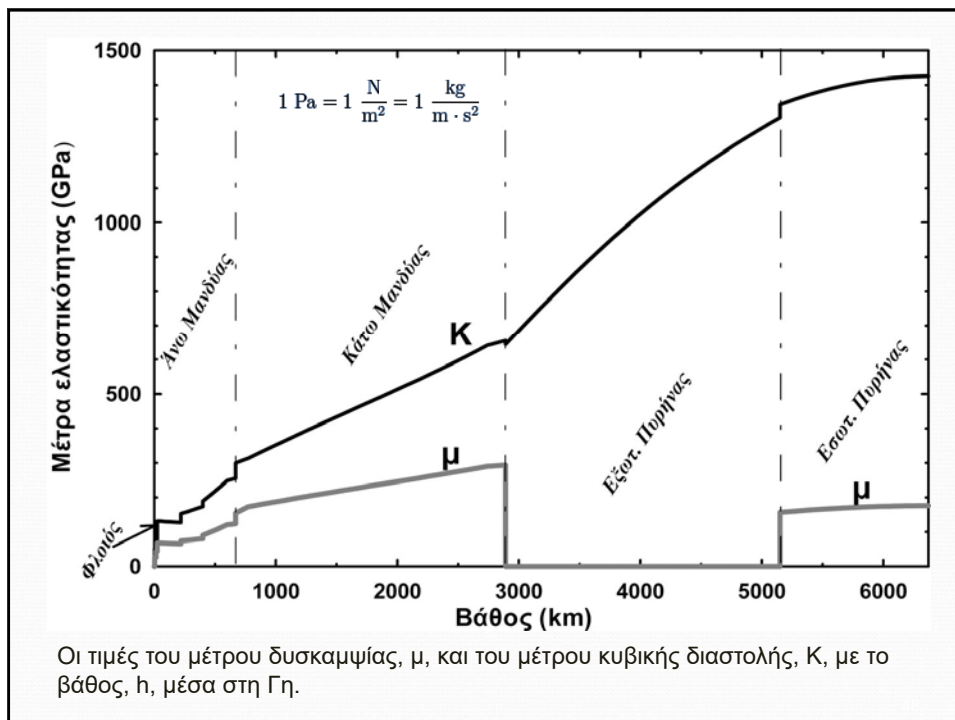
□ $\alpha, \beta, \rho \gg \gg$ γνωστή μεταβολή μέσα στη Γη

$$\lambda = \rho(\alpha^2 - 2\beta^2), \quad \mu = \rho\beta^2$$

$$K = \rho\left(\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2\right)$$

$$E = \frac{\rho\beta^2(3\alpha^2 - 4\beta^2)}{\alpha^2 - \beta^2}, \quad \sigma = \frac{\alpha^2 - 2\beta^2}{2(\alpha^2 - \beta^2)}$$

47



2.6 Μεταβολή της Ανελαστικότητας και του Ιξώδους στο εσωτερικό της Γης

- Αν και οι σεισμικές ταχύτητες και οι ελαστικές σταθερές προσδιορίζονται σχετικά εύκολα και δίνουν πολύτιμες πληροφορίες για το εσωτερικό της Γης, ιδιαίτερη σημασία έχουν και δύο άλλες παράμετροι που λειτουργούν συμπληρωματικά της ελαστικότητας (κυρίως για τον μανδύα), οι οποίες αφορούν την ανελαστική συμπεριφορά και το ιξώδες της Γης.
 - **Παράγοντας Ποιότητας, Q**
 - **Χρόνος Αποκατάστασης Maxwell, τ**
- Και οι δύο παράμετροι αφορούν **αποκλίσεις της συμπεριφοράς της Γης από το τέλειο ελαστικό σώμα** και περιέχουν ενδιαφέρουσες πληροφορίες για τη δομή και τη σύστασή της.

49

Ανελαστικότητα και ιξώδες στο εσωτερικό της Γης

Σε ένα τέλειο ελαστικό σώμα δεν έχουμε απώλειες ενέργειας σε ένα σεισμικό κύμα που διέρχεται από ένα υλικό σημείο του χώρου. Όμως στην πράξη ενέργεια χάνεται λόγω μετατροπής σε άλλη μορφή ενέργειας, για παράδειγμα θερμότητα. Αυτή η ιδιότητα της ύλης (INTRINSIC ATTENUATION) περιγράφεται με το Q

$$Q = -\frac{2\pi E}{\Delta E}$$

Παράγοντας ποιότητας Q (quality factor)
 Ελαστικό σώμα: $\Delta E \rightarrow 0$, $Q \rightarrow \infty$ μηδενική απόσβεση
 Γενικά, $Q_p \sim 2Q_s$

E η κορυφαία τιμή της ενέργειας παραμόρφωσης κύματος ($W = 1/2 \sigma_{ij}\epsilon_{ij}$)
 ΔE η ενέργεια που χάνεται σε κάθε κύκλο (μια περίοδο ή σε ένα μήκος κύματος)

Τα χαρακτηριστικά της ελαστικής συμπεριφοράς είναι:

- Η παραμόρφωση, ϵ , εκδηλώνεται **αμέσως** με την άσκηση τάσης, σ
- Η παραμόρφωση και η τάση εμφανίζουν **γραμμική** συσχέτιση
- Η παραμόρφωση είναι τελείως **ανακτήσιμη**

δηλαδή, $\sigma \propto \epsilon$

Ανελαστικότητα και ιξώδες στο εσωτερικό της Γης

Όλα τα μέτρα ελαστικότητας σε ένα **τέλεια ελαστικό σώμα** που υπακούν στο νόμο του Hooke ορίζονται με βάση κάποια σχέση της μορφής

$$\sigma = M \varepsilon$$

όπου σ η εφαρμοζόμενη τάση, ε η προκαλούμενη παραμόρφωση, και M κάποιο μέτρο ελαστικότητας (π.χ. λ , μ , E , K , κλπ.).

$$\sigma = E \varepsilon$$

Young's
modulus

Για τέλειο Νευτώνειο ρευστό υλικό ισχύει άλλη γραμμική σχέση:
Όπου η είναι το **ιξώδες** και $\dot{\varepsilon}$ ο **ρυθμός** παραμόρφωσης

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$$

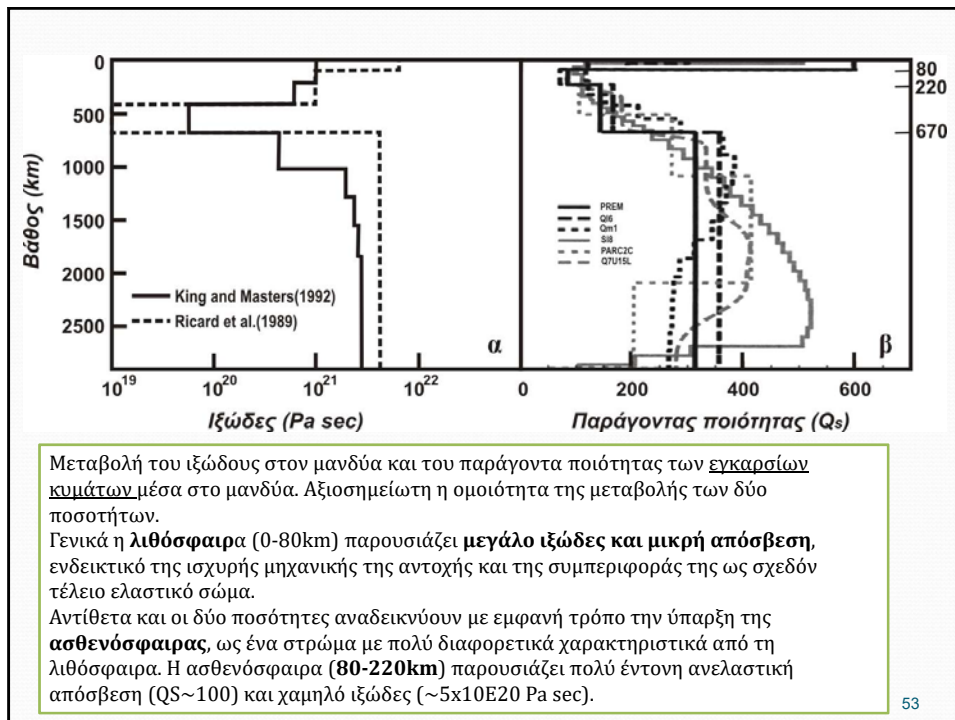
$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}}$$

Viscosity is basically the fluid's resistance to flow

Ανελαστικότητα και ιξώδες στο εσωτερικό της Γης

Ο **χρόνος αποκατάστασης Maxwell**, τ , καθορίζει αν ένα μέσο θα έχει **ελαστική** ($\tau \rightarrow 0$), **ιξώδη** ($\tau \rightarrow \infty$) ή **ιξωελαστική** συμπεριφορά (ενδιάμεσες τιμές). Το M είναι κάποιο μέτρο ελαστικότητας.

$$\tau = \frac{\eta}{M}$$



53

2.7 Η σύσταση του εσωτερικού της Γης

Η σύσταση στο εσωτερικό της Γης μεταβάλλεται γιατί:

- **Το υλικό είναι διαφορετικής χημικής σύστασης** γιατί αποτελείται από διαφορετικά χημικά στοιχεία.
 - Πυρήνας: κυρίως Fe.
 - Μανδύας-Φλοιός: πυριτικά υλικά, κυρίως O_2 , Si
- Ορισμένο **πέτρωμα** μπορεί να μετατραπεί σε άλλο πέτρωμα λόγω **ανακατανομής των χημικών συστατικών μεταξύ των ορυκτών του**, λόγω μεταβολής της P και T, **χωρίς μεταβολή της χημικής σύστασης (ισοχημική μεταβολή)**.
 - Πλαγιόκλαστα των βασικών πετρωμάτων του φλοιού διασπώνται στον μανδύα σε συστατικά του γρανάτη των εκλογιτών.
- Μπορεί ένα **ορυκτό του πετρώματος να μετατραπεί σε άλλο ορυκτό της ίδιας χημικής σύστασης αλλά διαφορετικής δομής αν βρεθεί σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (πολυμορφικός μετασχηματισμός)**.

Η σύσταση του εσωτερικού της Γης (συνέχεια)

Η μελέτη της σύστασης του εσωτερικού της Γης αποτελεί το κοινό πεδίο έρευνας δύο διαφορετικών κλάδων:

α) **Της πειραματικής Πετρολογίας-Γεωχημείας**, η οποία βασίζεται σε απευθείας παρατηρήσεις δειγμάτων πετρωμάτων. Τα δείγματα αυτά είτε μπορεί να βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης ή σχετικά κοντά σε αυτή είτε να προέρχονται από μετεωρίτες οι οποίοι αποκαλύπτουν πληροφορίες για το ηλιακό σύστημα και τους πλανήτες

β) **Της Γεωφυσικής** η οποία παρέχει πληροφορίες για τις γεωφυσικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης. Οι πληροφορίες αυτές όχι μόνο παρέχουν χρήσιμα στοιχεία για τις **συνθήκες προσομοίωσης των εργαστηριακών πειραμάτων** (πίεση, θερμοκρασία) αλλά κυρίως **παρέχουν στοιχεία για πολλές γεωφυσικές παραμέτρους** (μέτρα ελαστικότητας, ταχύτητες σεισμικών κυμάτων, πυκνότητα, ανελαστικές παράμετροι, κλπ.) που περιορίζουν σημαντικά, σε συνδυασμό με τα πειραματικά πετρολογικά δεδομένα, τις πιθανές συστάσεις του εσωτερικού της Γης. Μάλιστα, αυτή ήταν και ιστορικά η βασική προσέγγιση καθορισμού της σύστασης του εσωτερικού της Γης και κυρίως του μανδύα και του πυρήνα.

2.7.1 Καθορισμός της σύστασης της Γης με απευθείας παρατηρήσεις

- Οι παρατηρήσεις για τον καθορισμό της χημικής σύστασης του φλοιού αφορούν τα πετρώματα που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης ή μέχρι το βάθος που έχουν πραγματοποιηθεί γεωτρήσεις (~8km) με τις οποίες παίρνεται δείγμα υλικού.
- Φυσικά στην επιφάνεια της Γης βρίσκουμε σήμερα και πετρώματα που έχουν προέλθει από βάθος ακόμα και εκατοντάδων χιλιομέτρων, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την σύσταση του εσωτερικού της Γης.
- Με βάση τέτοιες παρατηρήσεις έχει πραγματοποιηθεί η κατάταξη των πετρωμάτων στις τρεις γνωστές κατηγορίες των ιζηματογενών, των μεταμορφωμένων (ή κρυσταλλοσχιστωδών) και των πυριγενών πετρωμάτων.
- Υπάρχουν παρατηρήσεις που δείχνουν ότι το **μάγμα**, το οποίο με τη μορφή λάβας βγαίνει στα ηφαίστεια, **κυρίως γεννιέται στον άνω μανδύα**, αν και συχνά έχει συνεισφορά από υλικό κυρίως του κατώτερου φλοιού, ιδιαίτερα στην περίπτωση του πλουτωνισμού και της ηφαιστειότητας στις ηπειρωτικές περιοχές. Υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι το κύριο τμήμα του βασαλτικού μάγματος που βρίσκουμε σήμερα στην επιφάνεια της Γης προέρχεται από βάθη μεταξύ **60km και 140km**, που σχεδόν συμπίπτουν με το ανώτερο τμήμα του **ασθενόσφαιρικού διαύλου (LVZ)**, το οποίο ορίζεται με βάση τις σεισμικές παρατηρήσεις. Προκύπτει, συνεπώς, ότι η ανάλυση του μάγματος δίνει άμεσες πληροφορίες για τη σύσταση του υλικού του άνω μανδύα.

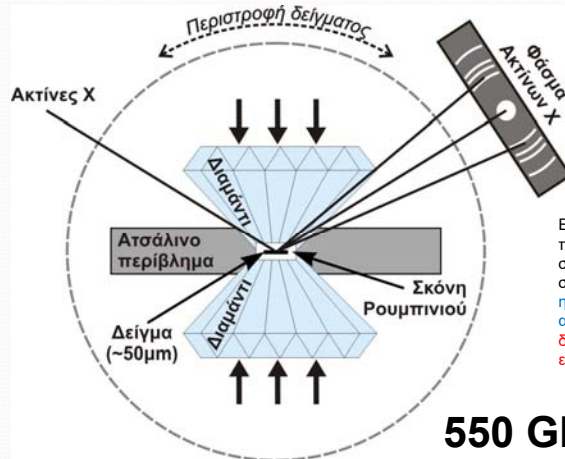
Καθορισμός της σύστασης της Γης με απευθείας παρατηρήσεις

- Ορισμένες απόψεις σχετικά με τη σύσταση του εσωτερικού της Γης βασίζονται στη χημική και ορυκτολογική ανάλυση **μετεωριτών**, που αποτελούν μέρος του ηλιακού μας συστήματος. Ορισμένες τέτοιες απόψεις βασίζονται και στη σύσταση του Ήλιου.
- Γενικά, η σύσταση του **πυρήνα** θεωρείται παρόμοια με τη σύσταση των **σιδηρομετεωριτών** και η **σύσταση του μανδύα** παρόμοια με τη σύσταση των **λιθομετεωριτών**.
- Οι απόψεις αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η Γη σχηματίστηκε από το πρωταρχικό πλανητικό υλικό από το οποίο προέρχονται και μετεωρίτες, με σταδιακή επαύξηση και στη συνέχεια το υλικό της διαφοροποιήθηκε, με το βαρύτερο σιδηρομεταλλικό υλικό να «βυθίζεται» και να συγκεντρώνεται στον πυρήνα, αφήνοντας το ελαφρύτερο πυριτικό υλικό στο μανδύα και τα πιο ετερογενή ελαφρύτερα υλικά στο φλοιό.

Καθορισμός της σύστασης με απ' ευθείας παρατηρήσεις

- Τα πλέον αξιόπιστα αποτελέσματα για τη σύσταση των βαθύτερων στρωμάτων της Γης (πυρήνας, μανδύας) έχουν προκύψει από εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποιούνται σε δείγματα υλικών που έχουν σημαντική πιθανότητα να συνθέτουν τον πυρήνα (Fe, Ni-Fe, FeSi, FeO, FeS, κλπ.) ή τον μανδύα (Mg, Al, Ca, κλπ) και υπό συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας της ίδιας τάξης με αυτές που επικρατούν στα βαθύτερα αυτά στρώματα, όπως αυτές αποκαλύπτονται από τα γεωφυσικά μοντέλα.
- **Θερμοκρασίες** της τάξης λίγων χιλιάδων βαθμών που επικρατούν στον πυρήνα παράγονται εύκολα (π.χ. με laser).
- **Πιέσεις** της τάξης εκατοντάδων GPa που επίσης επικρατούν στον πυρήνα παράγονται με ειδικές διατάξεις, όπως είναι οι διατάξεις των βραχύχρονων ελαστικών κυμάτων (shock waves) και **των αδαμάντινων κελιών αμοιού** (diamond anvil cell).

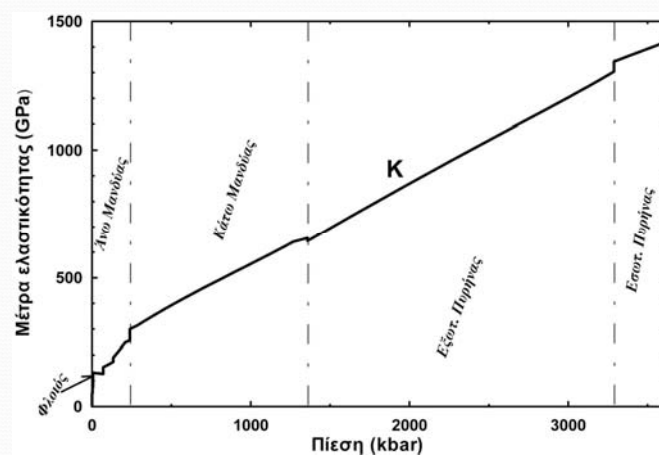
Μελέτη κρυσταλλικής δομής με αδαμάντινα κελιά αμοιού



Επιτρέπει την επίτευξη πιέσεων (μέχρι 550GPa) που ξεπερνούν ακόμα και τα επίπεδα της πίεσης στο κέντρο της Γης. Τα μελετώμενα δείγματα είναι συνήθως πολύ μικρά (περίπου 50μm x 10μm) και η κρυσταλλική δομή μελετάται με τη χρήση ακτίνων X, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι τα διαμάντια είναι διαφανή στις ακτίνες X και έχουν εξαιρετική μηχανική αντοχή.

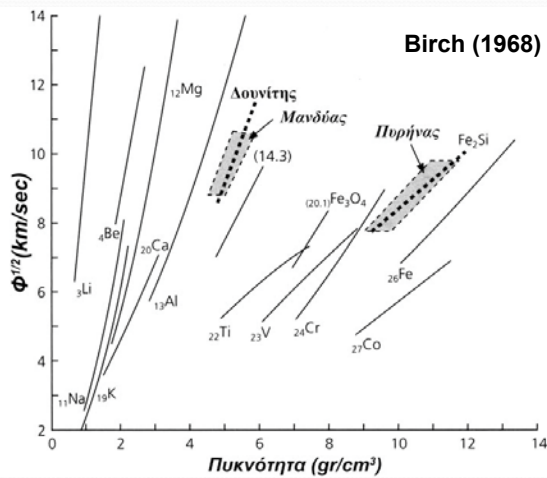
Σχηματική γεωμετρία από ένα διαμαντένιο κελί αμοιού (diamond anvil cell). Το μήκος κύματος του φθορισμού της σκόνης ρουμπινιού χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πίεσης ενώ οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής.

2.7.2 Σύσταση: γεωφυσικά δεδομένα



Μεταβολή του μέτρου κυβικής διαστολής, K με την πίεση. Το K μεταβάλλεται γραμμικά με την πίεση σε κάθε περιοχή του μανθιά και του πυρήνα με ομογενή χαρακτηριστικά (αμετάβλητη δομή ορυκτολογικής φάσης) και εμφανίζει μικρές ασυνέχειες μόνο στα όρια των διαφόρων ενοτήτων

Σύσταση: γεωφυσικά δεδομένα



Birch (1961) έδειξε ότι η ταχύτητα των P κυμάτων μεταβάλλεται γραμμικά με την πυκνότητα, ρ, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Vp = c(m) + d\rho \quad (2.24)$$

όπου η σταθερά c είναι συνάρτηση του μέσου ατομικού βάρους, m, του υλικού.

Γενικότερα, για την ταχύτητα χώρου, Vφ, ισχύει μία σχέση της μορφής:

$$\ln V\Phi = c'(m) + d'\ln\rho \quad (2.25)$$

όπου και c' και d' σταθερές.

Η μεγάλη σημασία των σχέσεων (2.24) και (2.25) είναι ότι αποτελούν εργαλεία ελέγχου χημικής ομοιογένειας, αφού αν ισχύει μία γραμμική σχέση (2.24) ή γενικότερα σχέση δύναμης (2.25) ανάμεσα στην ταχύτητα και την πυκνότητα σε κάποια περιοχή της Γης, αυτό δείχνει ότι το μέσο ατομικό βάρος, m, παραμένει σταθερό και μάλιστα αποκλύπτει και το γενικό είδος του πετρώματος το οποίο υπάρχει στην συγκεκριμένη περιοχή του εσωτερικού της Γης.

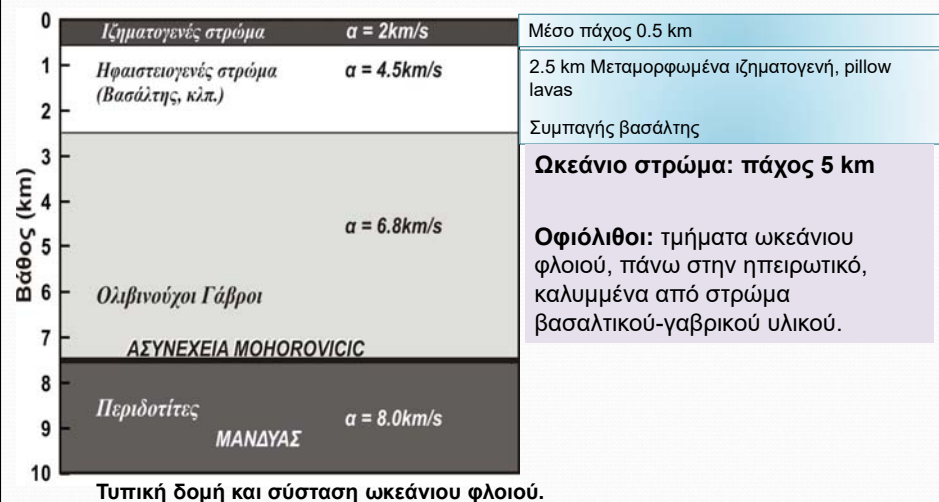
Μεταβολή της ταχύτητας χώρου, σε συνάρτηση με την πυκνότητα, ρ, από δεδομένα βραχύχρονων ελαστικών κυμάτων (shock waves) για διάφορα υλικά (φαίνεται ο μέσος ατομικός αριθμός). Η αντίστοιχη μεταβολή για τον μανδύα και τον πυρήνα από γεωφυσικές πληροφορίες παρουσιάζεται επίσης για σύγκριση, με σκιασμένες ζώνες

Φλοιός: ~ 0.5% της μάζας της Γης: τελικό προϊόν διαφοροποίησης μανδύα

2.7.3 Δομή και Σύσταση του Φλοιού

Ωκεάνιος Φλοιός

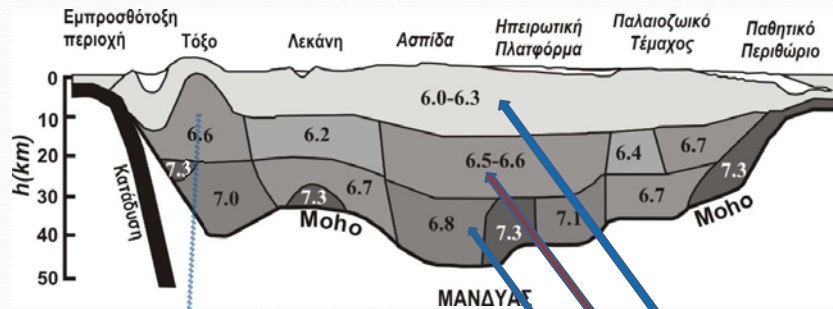
Δημιουργία: μεσο-ωκεάνιες ράχες από ένα **Θολεϊτικό βασάλτη** ή βασάλτη μεσο-ωκεάνιων ράχων (**MORB**), και προέρχεται από υλικό του μανδύα **Περιδοτικής σύστασης**



Δομή και Σύσταση του Φλοιού

Ηπειρωτικός Φλοιός

Δημιουργία: επίσης από υλικό μανδύα (που έχει εκπλυθεί, όπως και ο ωκεάνιος φλοιός). **Εξαιρετικά ανομοιογενής!!**



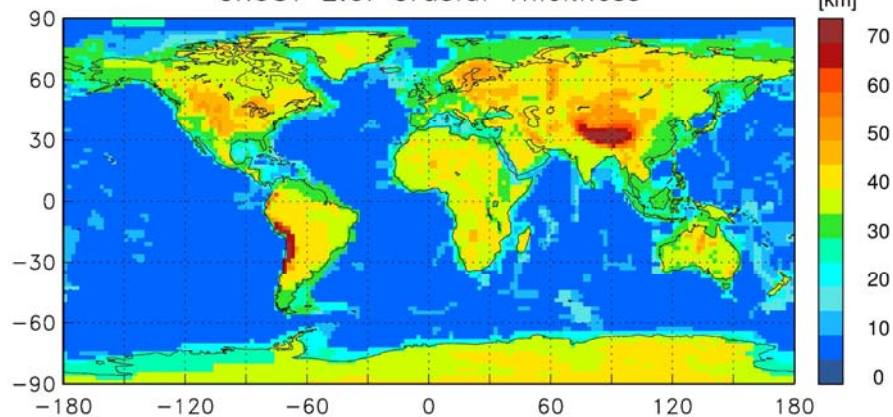
Διάυλος χαμηλών ταχυτήτων στα 10-25 km (κυρίως κάτω από ορογενή)

Πάνω φλοιός
Μέσος φλοιός
Κάτω φλοιός

Τυπική δομή ηπειρωτικού φλοιού, όπως εκφράζεται με τις ταχύτητες των επιμήκων κυμάτων κατά μήκος τομής που αρχίζει από περιοχή σύγκλισης λιθωσφαιρικών πλάκων (αριστερά) και καταλήγει σε περιοχή αδρανούς περιθωρίου (δεξιά)

Μεταβολή του πάχους του Φλοιού

CRUST 2.0: Crustal Thickness



- Αναδεικνύεται η διαφοροποίηση του ωκεάνιου φλοιού (τυπικά πάχη <10km) από τον ηπειρωτικό φλοιό.
- Ο ηπειρωτικός φλοιός κυριαρχείται από πάχη 30-45km, με τα μεγαλύτερα πάχη κάτω από τα Ιμαλάια και τις Άνδεις, όπου έχουμε πάχη που τοπικά φτάνουν ή και ξεπερνούν τα 70km.
- Αυτές οι πολύ μεγάλες παχύνσεις σχετίζονται με την κατάδυση ωκεάνιας πλάκας κάτω από ηπειρωτική και επαύξηση του φλοιού (Άνδεις) ή με έντονη ηπειρωτική σύγκρουση (Ιμαλάια).

Δομή και Σύσταση του Φλοιού **Ηπειρωτικός Φλοιός**

Άνω φλοιός: σύσταση παρόμοια με του **γρανοδιορίτη** **Conard**

Κάτω φλοιός: σύσταση παρόμοια με αυτή του **γρανουλίτη**

Η σημαντικότερη
χημική ασυνέχεια

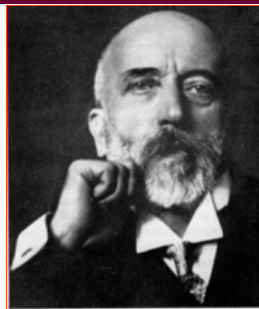
| <u>Κάτω φλοιός</u> | Moho | <u>Ανώτερος μανδύας</u> |
|--|-------------|---------------------------------------|
| Γρανουλίτες | >>> | υπερβασικά (ολιβίνης, πυρόξενοι κλπ.) |
| $\rho_{\mu} = 2.6-2.7 \text{ gr/cm}^3$ | >>> | $3.3-3.4 \text{ gr/cm}^3$ |

Η μικρή πυκνότητα του ηπειρωτικού φλοιού τον κρατάει στην επιφάνεια της Γης και δεν επιτρέπει την εύκολη ανακύκλωση του στον μανδύα.

Τμήμα των ιζημάτων του ωκεάνιου φλοιού ανακυκλώνεται στον μανδύα (περιοχές κατάδυσης). Όμως, τα περισσότερα προστίθενται στις ηπείρους (επαύξηση).

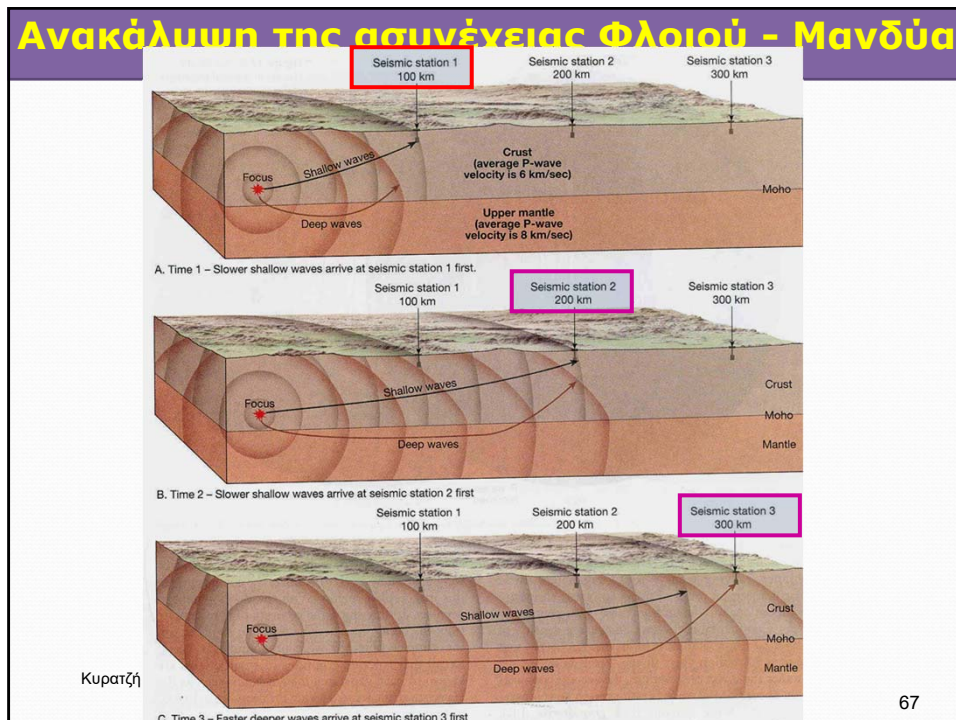
ΜΟΗΟ

Ασυνέχεια ΦΛΟΙΟΥ -ΜΑΝΔΥΑ



Ανακαλύφθηκε το 1909
κατά τη μελέτη
σεισμού της Κροατίας
Pokuplje (Kupa Valley)
8 October 1909

Ανδριја Μοχοροβίτσιτς
(1857-1936)



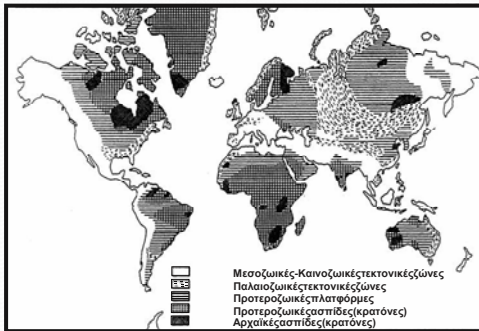
Moho

- Μια μεταβατική ζώνη πλάτους (πάχους) 0-5 km, με ιδιότητες που αλλάζουν από θέση σε θέση.
- Αντί να θεωρούμε τη Moho ως τη βάση ενός ομογενούς φλοιού
- Καλύτερα να τη θεωρούμε ως μια **ζώνη** όπου οι ταχύτητες των επιμήκων κυμάτων αυξάνουν απότομα με το βάθος, σε τιμές πάνω από ~7.7 km/sec.
- Η Moho δηλώνει τη μετάβαση από τον κατώτερο φλοιό (βασικής σύστασης = βασάλτης) στον ανώτερο μανδύα που είναι περιδοτικός

December 13, 2019

68

- Η μικρή πυκνότητα του ηπειρωτικού φλοιού και η δυνατότητα να «επιβιώνει» στο γεωλογικό χρόνο δημιουργεί μία ακόμα εξαιρετικά σημαντική διαφορά ηπειρωτικού και ωκεάνιου φλοιού, αυτή της ηλικίας.
- Ο παλαιότερος ωκεάνιος φλοιός ο οποίος δημιουργείται στις μεσωκεάνιες ράχες δέν ξεπερνάει τα **180 εκατομμύρια έτη** ενώ ο ηπειρωτικός φλοιός έχει τμήματα τα οποία είναι παλαιότερα ακόμα και **από 4 δισεκατομμύρια έτη**.



Κατανομή της ηλικίας του ηπειρωτικού φλοιού, όπου διακρίνουμε τρεις γενικές περιοχές:

- Μεγάλες αρχαίες περιοχές με σχετικά επίπεδη μορφολογία, απουσία ιζημάτων και κυρίαρχη παρουσία Προκαμβρίων πετρωμάτων, αδιατάρακτες για περισσότερο από 1 δισεκατομμύριο έτη, οι οποίες καλούνται **ασπίδες** ή **κρατόνες**,
- Περιοχές με ένα συνήθως λεπτό κάλυμμα Προτεροζωϊκών ή και νεώτερων ιζημάτων, συχνά θαλασσίων λόγω περιστασιακής βύθισής τους κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, οι οποίες ονομάζονται **πλατφόρμες** και,
- Νεότερες περιοχές με ορογενή και Φανεροζωϊκή παραμόρφωση, που συνήθως καλούνται **τεκτονικές ζώνες** και οι οποίες περιβάλλουν τους κρατόνες και τις ασπίδες, φανερώνοντας τη διαδικασία αύξησης των ηπείρων μέσω **επαύξησης (accretion)**.

69

2.7.4

Δομή και Σύσταση του Μανδύα

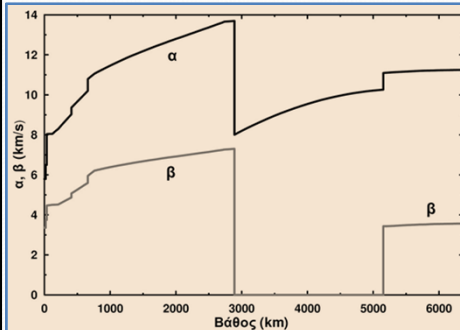
Πληροφορίες από:

- ▣ γεωφυσικά δεδομένα (ταχύτητα, πυκνότητα...)
- ▣ ανισοτροπία (του ολιβίνη)
- ▣ πετρολογία
- ▣ ξενόλιθοι μανδύα (σε κιμπερλίτες και βασάλτες)
- ▣ Χημισμός των χονδριτικών μετεωριτών ~ συμβατός με τη σύσταση μανδύα

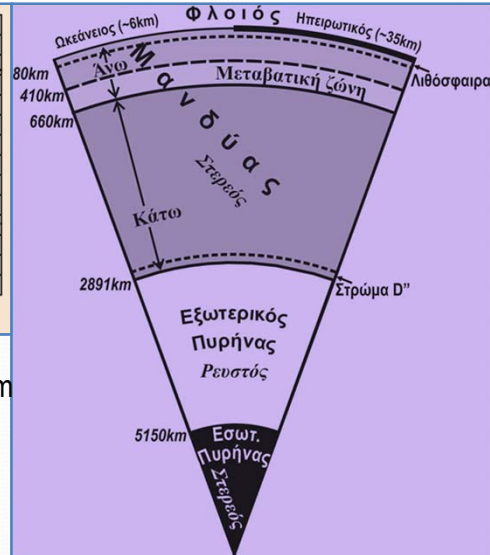
Κύριο συστατικό: πυριτικό μαγνήσιο με τη μορφή του **ολιβίνη** (στον ανώτερο μανδύα), και πετρολογικό τύπο τον **περιδοτίτη**.

Πυρολίτης: μίγμα περιδοτίτη-βασάλτη (3:1). Ικανοποιεί τις γεωφυσικές συνθήκες (ταχύτητες κ.λπ.) **για τον πάνω μανδύα** (Ringwood, 1975)

ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΑΝΩ ΜΑΝΔΥΑ 410 και 660 KM



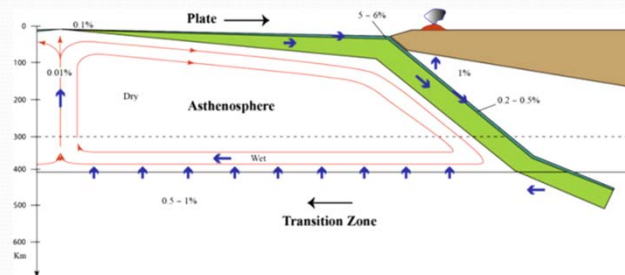
ανώτερος μανδύας Moho- μέχρι 660 km
 Μεταβατική ζώνη από 410-660 km
 κατώτερος μανδύας 660-2900 km
 D'' ζώνη: από τα 2600-2900 km



71

Μανδύας - Ιξώδες

- Η ασθενόσφαιρα (~80-220km) παρουσιάζει μεγάλη ανελαστική απόσβεση ($Q_s \sim 100$) και μικρό ιξώδες ($\sim 5 \times 10^{20}$ Pa sec). Η θερμοκρασία σε αυτό το βάθος πλησιάζει σημαντικά το **σημείο τήξης του μανδύα**
- Σε βάθη 410-660 km οι τιμές του ιξώδους είναι ακόμα μικρότερες ($\sim 10^{19}$ Pa sec) πράγμα που επιτρέπει την **ανάπτυξη ρευμάτων μεταφοράς στον άνω μανδύα**
- Στον κατώτερο μανδύα το ιξώδες αποκτά υψηλές τιμές ($\sim 10^{21}$ ως 10^{22} Pa sec) **αντίστοιχες με αυτές της λιθόσφαιρας**.



Large-scale asthenosphere circulation in the oceanic domain and cycle of water in the upper mantle. *Blue lines* represent transport of H₂O, while numbers indicate the estimated water content (% wt). *Red lines* show upwellings, downwellings, flows, and counterflows in the asthenosphere. Light and dark green regions represent, respectively, mantle lithosphere and crust that independently carry variable amounts of water

72

Ασυνέχεια των 410 km ολιβίνης >> σπινέλιο φάσης β

- Σε βάθος 410 Km εμφανίζεται **απότομη αύξηση** της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων, και αυτό το όριο είναι γνωστό ως η **ασυνέχεια των 410 Km**.
 - Η θερμοκρασία (1400 C) και η πίεση (13 GPa) σε αυτά τα βάθη επιτρέπουν **αλλαγή της κρυσταλλικής δομής του ολιβίνης** ο οποίος αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα ορυκτά του μανδύα.



- αύξηση κατά ~7% της πυκνότητας
- άλμα ~0.5km/sec στην ταχύτητα των P και ~0.25km/sec στην ταχύτητα των S κυμάτων
- **απελευθέρωση θερμότητας (εξώθερμη αντίδραση).**
- Στο ίδιο βάθος γίνεται επίσης μετατροπή της κρυσταλλικής δομής του **πυροξένου** σε δομή **γρανάτη**, χωρίς αυτό να έχει τις ίδιες εντυπωσιακές επιπτώσεις στις ταχύτητες των P και S κυμάτων.

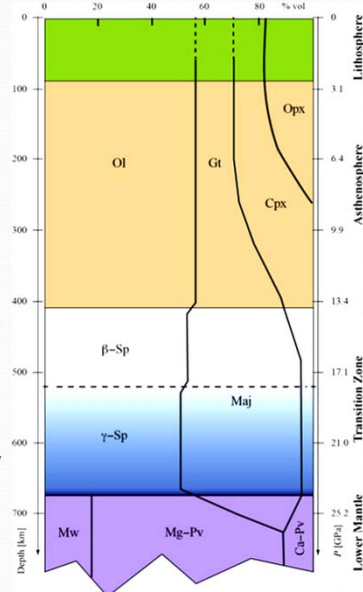
December 13, 2019

73

410-660 km: Μεταβατική ζώνη: σπινέλιο φάσης β >> σπινέλιο φάσης γ

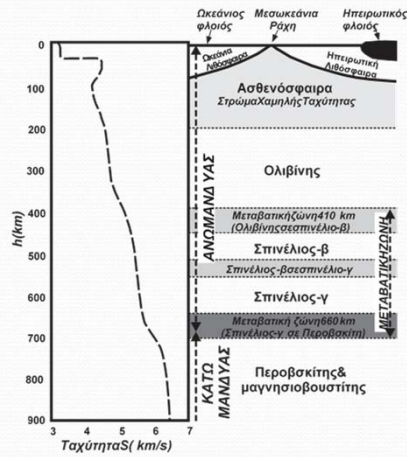
- Μέσα στη μεταβατική ζώνη και στις πιέσεις που αντιστοιχούν σε βάθος 520km ο σπινέλιος φάσης β μετατρέπεται σε σπινέλιο φάσης γ, χωρίς αυτή η μεταβολή να έχει σημαντική επίδραση στην ταχύτητα των κυμάτων χώρου.
- Σε βάθος 660 Km εμφανίζεται άλλη μια απότομη αύξηση της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων, και ο σπινέλιος γ μετασχηματίζεται κυρίως σε περοβσκίτη και μαγνησιοβουσίτη

Chemical composition of the mantle (% vol) in the pyrolytic model of Ringwood (1975). Maj is majorite garnet, Mg-PvDMg-perovskite, Ca-PvDCa-perovskite



Κάτω Μανδύας (660 - 2891 km)

- Ο κάτω μανδύας (660-2891km) αποτελείται κυρίως από δύο ορυκτολογικές φάσεις, τον μαγνησιοβουσίτη $(Mg,Fe)O$ και τον περοβσκίτη $(Mg,Fe)SiO_3$.
- Τα διαθέσιμα γεωφυσικά στοιχεία δείχνουν ότι και στα δύο ορυκτά κυριαρχεί το Mg σε σχέση με το Fe (περισσότερο από 80% Mg).
- Έχει δειχθεί πειραματικά ότι το σημείο τήξης των δύο αυτών ορυκτών είναι 5000K και 7000K, αντίστοιχα, από όπου προκύπτει ότι ο κάτω μανδύας είναι σε στερεά κατάσταση.
- Γενικά όλα τα διαθέσιμα γεωφυσικά και πετρολογικά στοιχεία δείχνουν ότι ο κάτω μανδύας είναι χημικά ισοδύναμος με τον άνω μανδύα και αποτελείται κατά κύριο λόγο από τον περοβσκίτη.



75

ΟΡΙΟ ΜΑΝΔΥΑ- ΠΥΡΗΝΑ (CMB):

Πολύ μικρή μεταβλητότητα της V_S , τουλάχιστον μέχρι τα ~2500 km. Συνεπώς:

«ομογενοποιημένος» κάτω μανδύας

Όριο μανδύα-πυρήνα (CMB): η πλέον ενεργός χημικά περιοχή της Γης

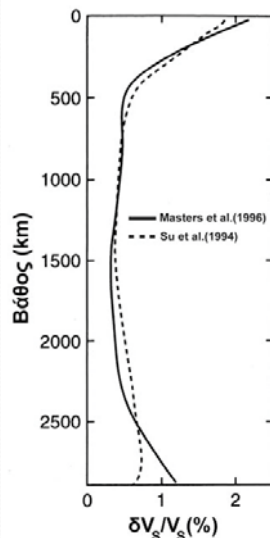
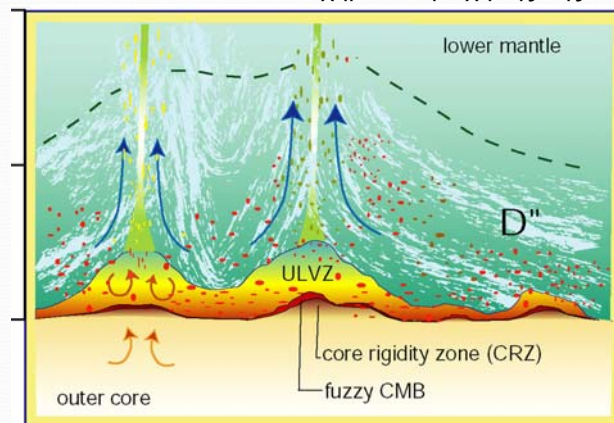


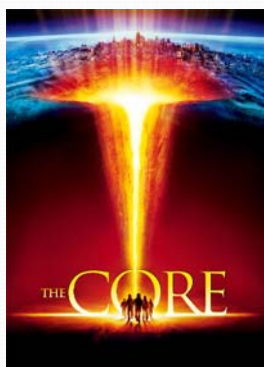
Image courtesy of E. Garnero



Στρώμα D''

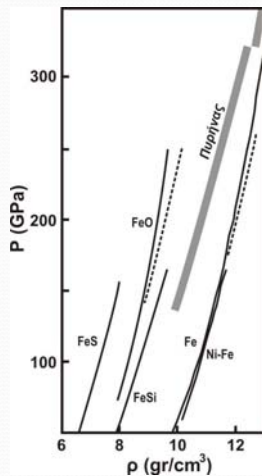
- Στα τελευταία περίπου 300km πάνω από το όριο μανδύα-πυρήνα, στο στρώμα D'' κατά Bullen, η κατάσταση του μανδύα αλλάζει, με σχετικά υψηλότερη ανελαστική απόσβεση και μεταβλητότητα της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων που ίσως ξεπερνάει το 1%.
- Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα υπό συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν στο όριο του μανδύα – πυρήνα έδειξαν ότι ο **υγρός σίδηρος και μάγματα - οξειδία σιδήρου του εξωτερικού πυρήνα αντιδρούν έντονα με στερεά οξειδία και στερεά πυριτικά του κάτω μανδύα.**
- **Δηλαδή, ο μανδύας και ο πυρήνας δεν βρίσκονται σε χημική ισορροπία και το όριό τους αποτελεί το πιο ενεργό χημικά τμήμα της Γης.**
- Η χημική αυτή δράση συμβάλλει στη δημιουργία του ανομοιογενούς στρώματος (D'' κατά Bullen) που μοιάζει με τη λιθόσφαιρα της Γης και περιλαμβάνει δομές δύο κατηγοριών,
 - τις 'κρυπτοπείρους' και 'κρυπτοωκεανούς' που αντιστοιχούν στις καταδυόμενες λιθόσφαιρες οι οποίες φτάνουν στο όριο μανδύα-πυρήνα (Core-Mantle-Boundary, CMB) και στους ανερχόμενους θύλακες (plumes) οι οποίοι συχνά είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία νέων ωκεανών.
- Τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν αύξηση των ταχυτήτων P και S στα 300-100km πάνω από το CMB και **μία έντονη μείωση των ταχυτήτων τα τελευταία 100-75km, δημιουργώντας έτσι ένα στρώμα πολύ χαμηλής ταχύτητας (Ultra Low Velocity Layer, ULVZ).**
- Το στρώμα αυτό οφείλεται σε τήξη του υλικού του μανδύα λόγω μεταφοράς ενέργειας από τον πυρήνα, φαινόμενο που εξηγεί και την έντονη μείωση των τιμών του Q_s στο στρώμα D'' Η δομή αυτή του D'' θυμίζει την αντίστοιχη δομή της λιθόσφαιρας και είναι ενδεικτική της ανομοιογένειας του στρώματος αυτού.

2.7.5 Δομή και Σύσταση του Πυρήνα



- Η μελέτη της σύστασης του πυρήνα της Γης είναι προφανώς πιο δύσκολη γιατί όχι μόνο δεν έχουμε άμεση πρόσβαση στο υλικό του, αλλά και γιατί υλικό προερχόμενο από τον πυρήνα δεν υπάρχει στην επιφάνεια της Γης.
- Για το λόγο αυτό οι γνώσεις μας σχετικά με τη σύσταση του πυρήνα προέρχονται αποκλειστικά από την εφαρμογή **έμμεσων μεθόδων και κυρίως εκείνων που βασίζονται σε μοντέλα κατανομής των σεισμικών ταχυτήτων στον πυρήνα.**
- Κάποια συμβολή στον καθορισμό της σύστασης του πυρήνα της Γης προέρχεται από τη γνώση της σύστασης του **Ηλίου και των μετεωριτών.**
- Εάν βασιστούμε στη σύσταση του Ηλίου ο κάτω μανδύας μπορεί να περιέχει 15% FeO και ο πυρήνας να είναι πλούσιος σε σίδηρο και να αποτελείται από Fe_2O .
- Εάν βασιστούμε στη σύσταση των μετεωριτών ο κάτω μανδύας πρέπει να έχει τη σύσταση των λιθομετεωριτών και ο πυρήνας αποτελείται από σίδηρο με μικρό ποσοστό (~5%) νικελίου.
- Όμως, η εκτίμηση αυτής της σύστασης βασίζεται στην υπόθεση ότι η Γη σχηματίστηκε με 'επαύξηση' από υλικό μετεωριτών, υπόθεση που δεν είναι πλήρως αποδεκτή.

Δομή και Σύσταση του Πυρήνα



Μεταβολή της πίεσης P με την πυκνότητα ρ σε πέντε δείγματα υλικών, όπως αυτή βρέθηκε στο εργαστήριο.
Η γκριζα γραμμή αντιστοιχεί στη μεταβολή που υπολογίστηκε γεωφυσικά για τον πυρήνα (Jeanloz, 1983).

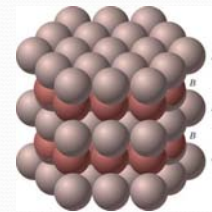
Εξωτερικός πυρήνας: κυρίως Fe, και περίπου 7% άλλα στοιχεία (O, S, κλπ.).

Εσωτερικός πυρήνας: πιθανώς από Fe που βρίσκεται σε εξαγωνική φάση κλειστής δομής (φάση-ε) και, ίσως, λίγο Ni.

Hexagonal Closed Packed Structure (HCP)



2D Projection



Δομή και Σύσταση του Πυρήνα

- Ενώ η **υγρή κατάσταση του εξωτερικού πυρήνα** είναι γνωστή εδώ και πολλές δεκαετίες, η φύση της **στερεάς κατάστασης του εσωτερικού πυρήνα** είναι γενικά λιγότερο γνωστή.
- Αν και **οι ελεύθερες ταλαντώσεις της Γης απαιτούν ένα στερεό πυρήνα**, ο λόγος του Poisson, σ , είναι 0.4, τιμή που βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές που συναντάμε στην υπόλοιπη Γη.
- Οι οποίες είναι περίπου ίσες με $\sigma=0.25$ (τέλειο στερεό με $\alpha=3\sqrt{\beta}$) και στην τιμή που αντιστοιχεί σε υγρή κατάσταση ($\sigma=0.5$), όπως στον εξωτερικό πυρήνα.
- Αυτή η μεγάλη τιμή του σ στον εσωτερικό πυρήνα είναι συμβατή με το **μεταλλικό του χαρακτήρα** αφού τα μέταλλα σε μεγάλες πιέσεις έχουν ασυνήθιστα μεγάλες τιμές του σ , όπως είναι αυτή στον εσωτερικό πυρήνα.

2.8 Ανισοτροπία στο εσωτερικό της Γης

Ανισοτροπία: Με τον όρο ανισοτροπία αναφερόμαστε όχι στην ανομοιογένεια, αλλά στη διαφορετική ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε ένα σημείο του χώρου, ανάλογα με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (P ή S).

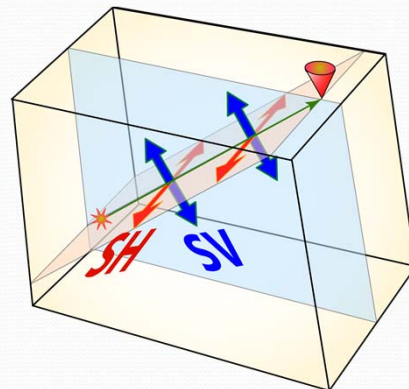
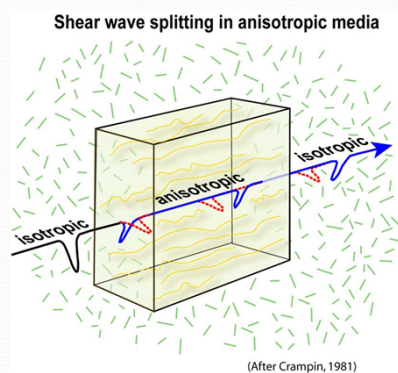
Δύο βασικές κατηγορίες

Γεωμετρική ανισοτροπία: οφείλεται σε ομογενή υλικά με στρώση (π.χ. γνεύσιος), στα οποία τα κύματα διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα παράλληλα ή κάθετα προς τις στρώσεις.

Ανισοτροπία πλέγματος: οφείλεται στην σεισμική ανισοτροπία των κρυστάλλων των ορυκτών. Οι ταχύτητες είναι διαφορετικές σε διαφορετικές διευθύνσεις του πλέγματος τους.

Γεωμετρική ανισοτροπία – Shear wave splitting

Εγκάρσια / ακτινική ανισοτροπία: η οριζόντια στρωμάτωση ενός γεωλογικού σχηματισμού οδηγεί σε πιο γρήγορη διάδοση των οριζόντια πολωμένων εγκαρσίων κυμάτων, **SH**, από αυτή των κατακόρυφα πολωμένων εγκαρσίων κυμάτων, **SV**. Αυτή είναι μία καθαρά γεωμετρική ανισοτροπία, με αποτέλεσμα τα επιφανειακά κύματα Love (στάσιμα SH) να ταξιδεύουν πιο γρήγορα από τα επιφανειακά κύματα Rayleigh (στάσιμα SV). Η ανισοτροπία αυτή είναι έντονη στον κατώτερο φλοιό και σε μεγάλο τμήμα της λιθόσφαιρας (LID) και της ασθενόσφαιρας (LVZ)



Ανισοτροπία του ολιβίνη

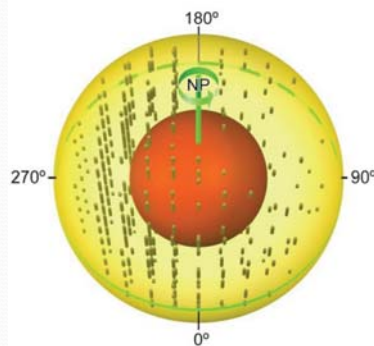
- Η έντονη ανισοτροπία του ολιβίνη απέκτησε ιδιαίτερη σημασία από το γεγονός ότι ο ολιβίνης αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του άνω μανδύα και διαπιστώθηκε ότι έχει την τάση να προσανατολίζει τον άξονα [100] (επίπεδο- a) με τη διεύθυνση κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών.
- Έτσι διαπιστώθηκε ότι στις μεσο-ωκεάνιες ράχες όπου οι κρύσταλλοι ολιβίνη της λιθόσφαιρας (άνω μανδύας) προσανατόλιζαν τον άξονα [100] παράλληλα με τη διεύθυνση κίνησης (κάθετα στις ράχες), η ταχύτητα των P κυμάτων ήταν έως και 10% μεγαλύτερη από ότι παράλληλα με τις ράχες.
- Η ανισοτροπία αυτή «παγώνει» μέσα στην ωκεάνια λιθόσφαιρα, με αποτέλεσμα να καταγράφει την ιστορία της απόκλισης των πλακών στις μεσοωκεάνιες ράχες.
- Ο προσανατολισμός του ολιβίνης είναι πιο έντονος μέσα στην ασθενόσφαιρα (στρώμα LVZ), όπου το χαμηλό ιξώδες επιτρέπει την εύκολη ευθυγράμμιση των κρυστάλλων ολιβίνης με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τόσο οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου όσο και των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και Love.

83

Ανισοτροπία πλέγματος στον εσωτερικό πυρήνα

Εξωτερικός πυρήνας: υγρή κατάσταση, χαμηλό ιξώδες, όχι ανισοτροπία.

Εσωτερικός πυρήνας: έντονη ανισοτροπία με έναν άξονα συμμετρίας παράλληλο με αυτόν της περιστροφής της Γης



Εσωτερικός πυρήνας (~1220 km). Η σφαίρα με ακτίνα ~500 km έχει άλλου τύπου ανισοτροπία.

Οι γραμμές παριστάνουν την ευθυγράμμιση των κρυστάλλων Fe στο έξω μέρος του εσωτερικού πυρήνα, με μέγεθος ανάλογο της ευθυγράμμισης και συνεπώς της ανισοτροπίας.

Η «γρήγορη» διεύθυνση είναι παράλληλη προς τον άξονα περιστροφής.

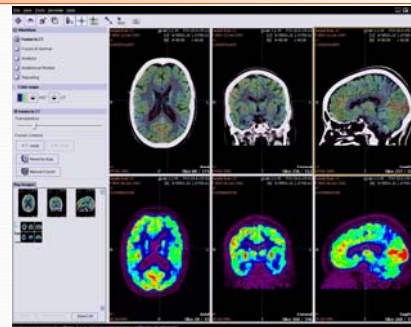
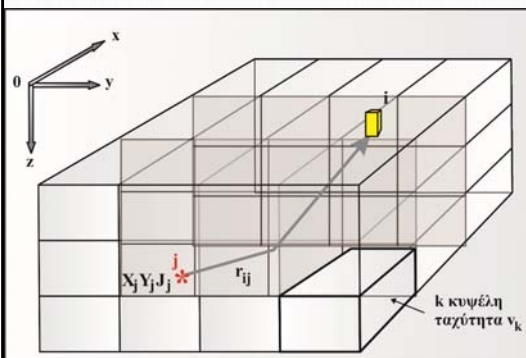
Ανισοτροπία πλέγματος στον εσωτερικό πυρήνα

Εσωτερικός πυρήνας: έντονη ανισοτροπία με έναν άξονα συμμετρίας παράλληλο με αυτόν της περιστροφής της Γης

- Στην πραγματικότητα ο **άξονας της ανισοτροπίας σχηματίζει μία μικρή γωνία με τον άξονα περιστροφής.**
- Μία εξαιρετικής σημασίας συνέπεια αυτής της απόκλισης και της ανισοτροπίας του πυρήνα είναι η **έντονη μεταβολή των χρόνων άφιξης των P κυμάτων τα οποία διέρχονται μέσα από τον εσωτερικό πυρήνα, αφού αυτά που διαδίδονται παράλληλα με τον άξονα συμμετρίας της ανισοτροπίας εμφανίζουν μικρότερους χρόνους διαδρομής.**
- Παρατηρήσεις ακριβείας των τελευταίων δύο δεκαετιών δείχνουν ότι ο **άξονας της ανισοτροπίας συνεχώς αλλάζει, το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με μία σταθερή περιστροφή του πυρήνα κατά περίπου 0.2-0.3%/έτος σε σχέση με τον μανδύα.**
- Η παρατήρηση αυτή, που είναι σε συμφωνία με θεωρητικά μοντέλα, δείχνει ότι ο **πυρήνας κάνει μία πλήρη περιστροφή πιο γρήγορα από το μανδύα κάθε 1000-2000 έτη,**
- γεγονός που φαίνεται να έχει εξαιρετική σημασία για μία σειρά από φαινόμενα όπως για το μηχανισμό της αυτό-διεγερόμενης γεννήτριας, για το μαγνητικό πεδίο, τις εποχιακές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου, τη διάρκεια της ημέρας, κλπ.

2.9 3-D δομή του εσωτερικού της Γης Τομογραφία

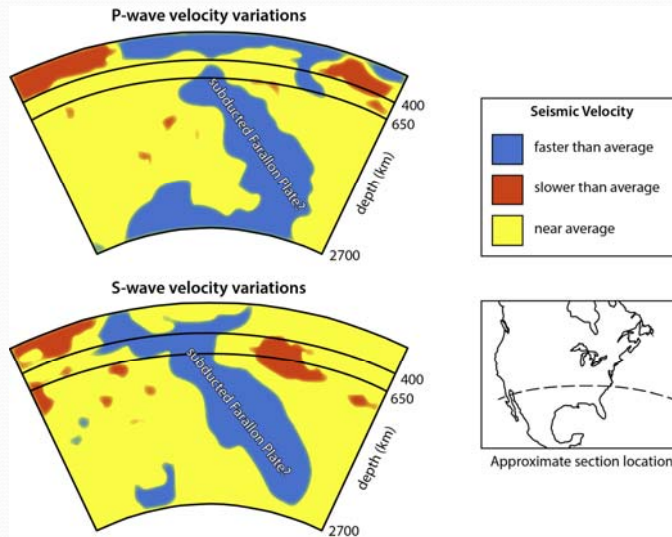
Πως δουλεύει;



Σύστημα αναφοράς και τρισδιάστατο σύστημα κυψελών το οποίο χρησιμοποιείται στη σεισμική τομογραφία. Φαίνεται η πορεία μιας σεισμικής ακτίνας ενός τοπικού σεισμού.

Tomography

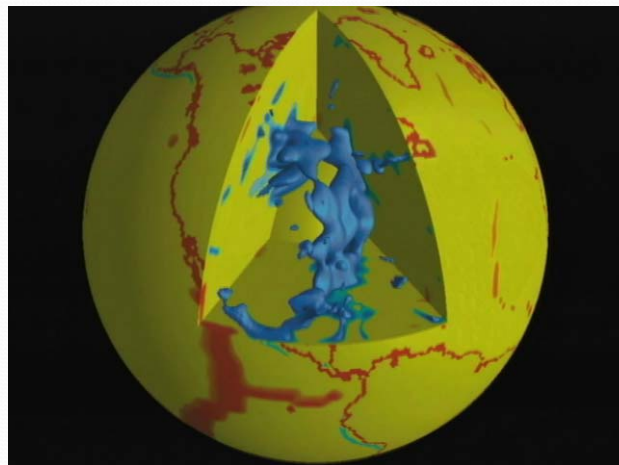
- Recent models of global body waves used over 10^7 travel times to model 10^5 to 10^6 unknowns



Simplified and interpreted P- and S-wave velocity variations in the mantle across southern North America showing the subducted Farallon Plate.

87

NASA tomographic image of the subducted Farallon Plate in the mantle beneath eastern North America.



88