

ΕΚΤΑΚΤΟΣ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 18ΗΣ ΑΠΡΙΛΙΟΥ 1989

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΣΟΛΩΝΟΣ ΚΥΔΩΝΙΑΤΟΥ

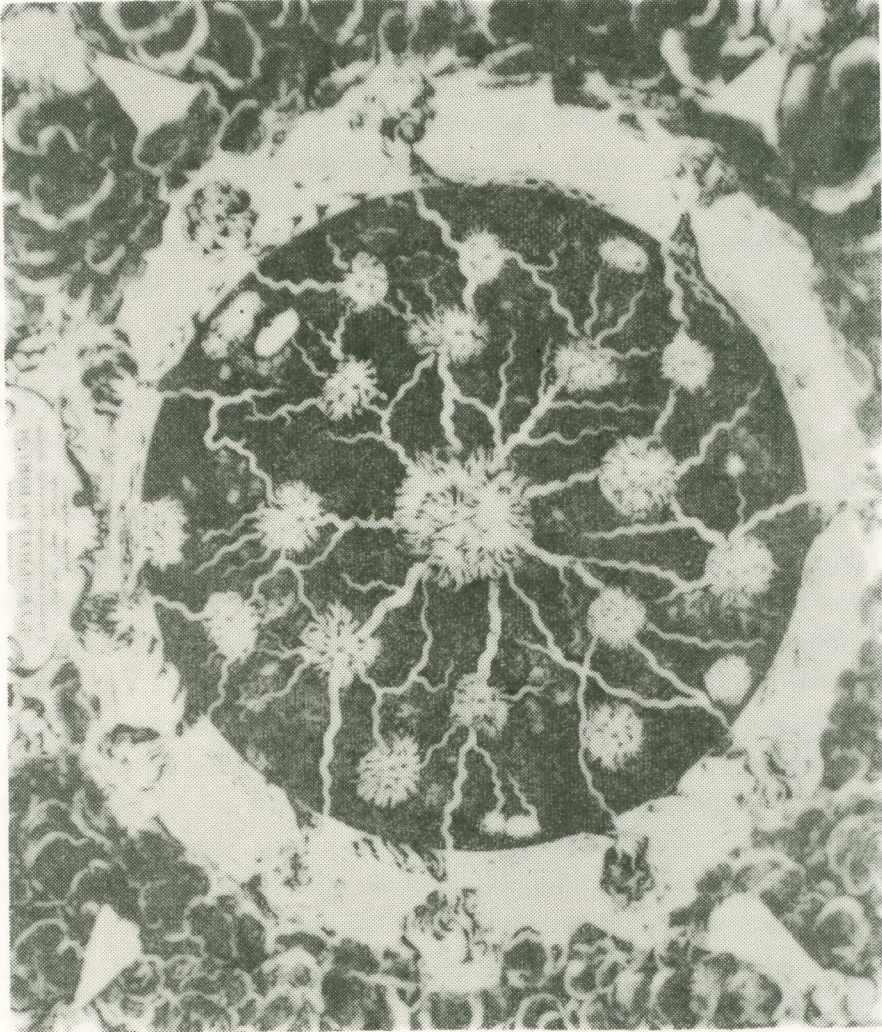
ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΟΣ ΑΙΩΝΑΣ  
100 ΧΡΟΝΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΑΝΑΓΡΑΦΗ  
ΜΑΚΡΙΝΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΚΑΔΗΜΑΤΙΚΟΥ Κ. ΑΓΓΕΛΟΥ ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΥ

*Οι γνώσεις μας για την εσωτερική δομή της Γης παρουσίασαν θεαματική πρόοδο από την 18<sup>η</sup> Απριλίου 1889, που έγινε η πρώτη αναγραφή μακρινού σεισμού, στις 2 ώρες και 7 λεπτά. Η αναγραφή έγινε τυχαία στο Πότσδαμ με οριζόντιο εκκρεμές, σε απόσταση 9.000 χλμ. από τη θέση αναχώρησης των σεισμικών κυμάτων. Η ώρα αναγραφής του σεισμού αυτού αποτελεί την γενέθλιο ώρα της ενόργανης Σεισμολογίας, η Σεισμομετρίας, κύριου όργανου ξρευνας της Γεωλογίας βάθους και εντοπισμού των πλουτοπαραγωγικών πηγών στα ενδότερα της Γης, ιδία των πετρελαιοφόρων κοιτασμάτων της και των υπόγειων πυρηνικών εκρήξεων. Ο εντοπισμός των τελευταίων αποτελεί το μοναδικό μέσον επαλήθευσης των επιδιωκόμενων συνθηκών κατάπαυσης των υπόγειων πυρηνικών εκρήξεων, που γίνονται σ' ένα αχαλίνωτο αγώνα για την επαύξηση της καταστρεπτικότητας των υφισταμένων πυρηνικών όπλων.*

*Όπως φαίνεται από διαφόρους μύθους και αφηγήσεις στην αρχαιότητα οι λαοί θεωρούσαν το κέντρο της γης ως τον «κάτω κόσμο». Στους σκοτεινούς διαδρόμους, στο ξρεβος του «κάτω κόσμου» όπου περιφερόταν εντρομος ο Δάντης, βασίλευε μυστήριο, θερμότητα, ζόφος, αναταραχή και σάλος. Στους ελληνικούς χρόνους οι δοξασίες για τον «κάτω κόσμο» διαμορφώθηκαν από τις ήφαιστειακές εκρήξεις της Μεσογείου και ιδίως του Αιγαίου. Υπάρχουν διάφορες περιγραφές και παραστάσεις που μιλούν μέχρι και το 1800 (βλ. εικ. 1) για μεγάλα υπόγεια έγκοιλα, όπου άερια και θειοῦχοι άνεμοι, που έπνεαν με μεγάλη σφοδρότητα προκαλούσαν ισχυρές δονή-*

σεις. Στην ανατολική Μεσόγειο το μεγαλύτερο μέρος τῶν δονήσεων ἔχουν ὑποθαλάσσια ἔστια. Γι' αὐτὸ καὶ οἱ ἀρχαῖοι Ἕλληνες πίστευαν ὅτι ὁ «ἐνοσίχθων» Ποσειδῶν ἦταν ὁ «τινάκτωρ γαίας», ποὺ συνταράσσει τὴ Γῆ. Ὁ ἐγκέλαδος εἶναι νεώτερη δοξασία. Ἡ Παλαιὰ Διαθήκη μιλάει ἐπίσης γιὰ τὴν φλογόεσσα κάμινο στὸ βασίλειο τῶν νεκρῶν, τὸν Ἅδη.



Εἰκ. 1. Τὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς σύμφωνα μετὶς ἀπόψεις ποὺ ἐπικρατοῦσαν μέχρι τὸ 1800 περίπου. Ἡ Γῆ ἦταν σφαῖρα ἀπὸ στερεὸ ὕλικό. Μέσα στὸ ἐσωτερικὸ τῆς γῆινης σφαίρας ὄχετοὶ μὲ μάγμα συνδέον θάλακες με ἐκρηκτικὰ ἀέρια τὰ στόματα τῶν ἠφαιστείων ποὺ βρῖσκονται στὴν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς.

Ἡ ἀνάπτυξη τῆς σύγχρονης ἐπιστήμης ἄρχισε κυρίως ἀπὸ τὴν ἐποχὴ τοῦ Νεύτωνα. Μετὰ τὴν ἀνακάλυψη τοῦ νόμου τῆς βαρύτητας ἀναπτύχθηκε μιὰ ρεαλιστικὴ ἄποψη γιὰ τὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς. Ἡ ἄποψη αὐτὴ στηρίχθηκε κυρίως στὶς ἀναλογίες ποὺ πρέπει νὰ ὑπάρχουν μεταξὺ τῶν ἐπιφανειακῶν πετρωμάτων καὶ τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς.

Μεταξὺ τοῦ 1774 καὶ 1776, ὁ ἀστρονόμος *Nevil Maskelyne*, βασιζόμενος στὶς ιδέες τοῦ Νεύτωνα γιὰ τὶς ἔλξεις ποὺ ἀσκοῦνται μεταξὺ τῶν μαζῶν τῶν σωμάτων, ἐφάρμοσε ἕναν ἀπλὸ ἀλλὰ ξυμπνο τρόπο γιὰ νὰ ζυγίσει ὁλόκληρη τὴ Γῆ. Μέτρησε στὴ Σκωτία τὴν ἀπόκλιση νήματος στάθμης ἀπὸ τὸ ὄρος *Schihallion*. Γνωρίζοντας τὴ μάζα τοῦ ὄρους καὶ τὴν ἀπόσταση τοῦ κέντρου τῆς ἀπὸ τὸ νῆμα τῆς στάθμης καὶ τὸ κέντρο τῆς Γῆς, ὑπολόγισε τὴ μάζα τῆς. Μετὰ τὸν ὑπολογισμό τῆς γήινης μάζας, διαιρώντας αὐτὴ μὲ τὸν ὄγκο τῆς βρῆκε ὅτι ἡ μέση πυκνότητα τῆς Γῆς ἦταν 4,5 φορὲς μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν πυκνότητα τοῦ νεροῦ, δηλαδὴ διπλάσια ἀπὸ τὴν πυκνότητα τοῦ γρανίτη. Ἡ τιμὴ αὐτὴ βελτιώθηκε τὸ 1789 ἀπὸ τὸ λόρδο *Cavendish*. Ὁ *Cavendish* μέτρησε τὴ γωνία στροφῆς ὀριζόντιας ράβδου ἐνὸς στρεπτοῦ ζυγοῦ χρησιμοποιώντας δύο μεγαλύτερες σφαῖρες ἀπὸ μολύβι ποὺ τοποθέτησε πλησίον τῶν μικρῶν μαζῶν του. Ἀπὸ τὴ στροφῆ τῆς ράβδου τοῦ ζυγοῦ ὑπολόγισε τὴ σταθερὰ ποὺ ὑπάρχει στὴν ἐξίσωση τοῦ Νεύτωνα. Γνωρίζοντας τὴ σταθερὰ ἦταν εὐκόλο νὰ βρεῖ τὴ μέση πυκνότητα τῆς Γῆς. Ἡ τιμὴ 5,45  $\text{gr/cm}^3$  ποὺ βρῆκε εἶναι πολὺ κοντὰ στὴν τιμὴ 5,52  $\text{gr/cm}^3$  ποὺ βρέθηκε ἀργότερα μὲ ἀκριβέστερες μεθόδους.

Ἔτσι, ἀπὸ τὶς ἀρχὲς τοῦ 19ου αἰῶνα ἦταν γνωστὸ ὅτι ἡ μέση πυκνότητα τῆς Γῆς ἦταν περίπου διπλάσια ἀπὸ τὴν πυκνότητα τῶν συνήθων πετρωμάτων. Ἀπὸ αὐτὸ ἦταν φανερὸ ὅτι δὲν ὑπῆρχαν ἔγκοιλα σὲ μεγάλα βάθη· ἀντίθετα, τὰ ὕλικά στὰ βάθη αὐτὰ πρέπει νὰ εἶχαν μεγαλύτερη πυκνότητα.

Μετρήσεις τόξων μεσημβρινοῦ σὲ διαφόρους τόπους κατὰ τὰ μέσα τοῦ 19ου αἰῶνα ἔδειξαν ὅτι ἡ Γῆ δὲν εἶχε ἀκριβῶς σχῆμα σφαίρας, ἀλλὰ ἐλλειψοειδὲς μὲ τὴν ἰσημερινὴ ἀκτῖνα κατὰ 20 χλμ. περίπου μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν πολικὴ. Οἱ μαθηματικοὶ τῆς ἐποχῆς ἐκείνης θεώρησαν ὅτι ἡ Γῆ ἀρχικὰ ἦταν ὑγρὴ σφαῖρα ποὺ ἀπόκτησε μὲ τὸ χρόνο ἐλλειψοειδὲς σχῆμα λόγω τῆς ἀμοιβαίας ἔλξης τῶν ὕλικῶν τῆς καὶ τῶν φυγοκέντρων δυνάμεων ποὺ ἀναπτύσσονται ἀπὸ τὴν περιστροφὴ τῆς.

Ἀπὸ τὴν ἐλλειπτικότητα τῆς Γῆς ἦταν εὐκόλο νὰ σκεφθοῦν ὅτι τὰ πετρώματα διανέμονται στὸ βάθος ἀνάλογα μὲ τὴν πυκνοτήτά τους. Ἡ αὔξηση τῆς πυκνότητας μὲ τὸ βάθος μπορεῖ νὰ ὀφείλεται εἴτε σὲ μεγαλύτερη βύθιση τῶν βαρύτερων ὕλικῶν, εἴτε σὲ τεράστιες ἐλκτικὲς δυνάμεις πρὸς τὸ κέντρο τῆς Γῆς. Ἐὰν ἡ αὔξηση τῆς πυκνότητας ὀφειλόταν σὲ κεντρικὲς δυνάμεις, θεωρητικὰ θὰ ἦταν δυνατὸ νὰ ὑπολογισθεῖ ἡ ταχύτητα μεταβολῆς τῆς πυκνότητας μὲ τὸ βάθος.

Γιὰ τὸν ὑπολογισμό αὐτὸ χρειάζονται τέσσερις ποσότητες: Ἡ πυκνότητα τῶν ἐπιφανειακῶν πετρωμάτων, ἡ μέση πυκνότητα τῆς Γῆς, τὸ ἀποτέλεσμα τῆς πίεσης στὴν πυκνότητα καὶ τὸ ἀποτέλεσμα τῆς πυκνότητος στὴν ἐλλειπτικότητα. Οἱ μαθηματικοὶ τοῦ 19ου αἰῶνα συνέδεσαν τὶς ποσότητες αὐτὲς μὲ ἐξισώσεις. Λαμβάνοντας ὡς πυκνότητα τῶν ἐπιφανειακῶν πετρωμάτων τὴν τιμὴ  $2,5\text{gr/cm}^3$  καὶ λύνοντας τὶς ἐξισώσεις ποὺ συνδέουν τὶς ποσότητες αὐτὲς, πέτυχαν νὰ ὑπολογίσουν τὴ μεταβολὴ τῆς πυκνότητος ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς μέχρι τὸ κέντρο της.

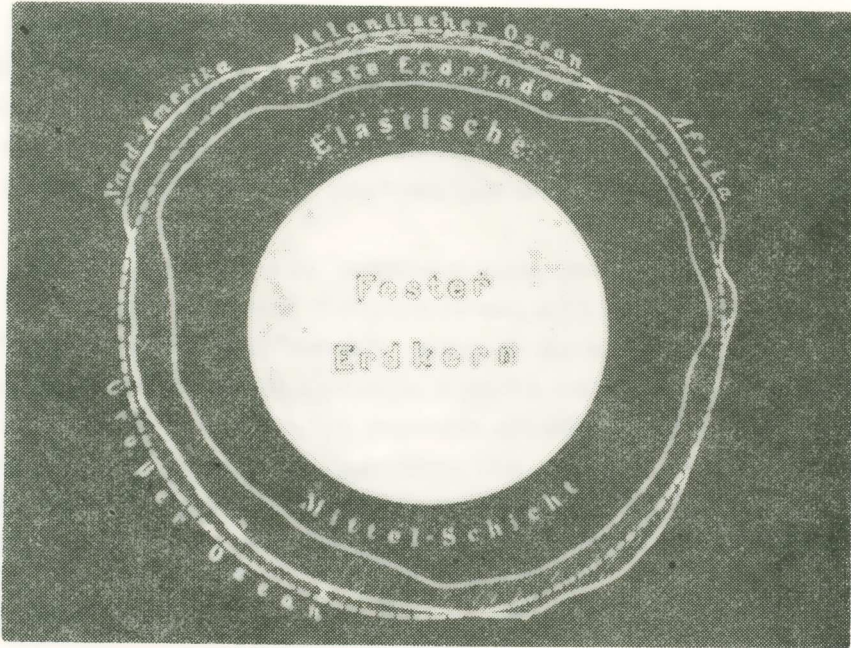
Ἡ μέση πυκνότητα τῆς Γῆς ποὺ προέκυπτε ἀπὸ τὴ μεταβολὴ της μὲ τὸ βάθος ὄφειλε προφανῶς νὰ συμφωνεῖ μὲ αὐτὴ ποὺ εἶχε βρεῖ ὁ Cavendish. Μὲ τὸ σκεπτικὸ αὐτὸ κατέληξαν νὰ βροῦν ὅτι ἡ πυκνότητα τῶν ὀλιγῶν στὸ κέντρο τῆς Γῆς ἦταν 10 ἕως  $12\text{ gr/cm}^3$ . Οἱ τιμὲς αὐτὲς εἶναι πολὺ κοντὰ στὶς τιμὲς ποὺ δεχόμαστε σήμερα γιὰ τὸ κέντρο τῆς Γῆς.

Μετὰ τὸν ὑπολογισμό τῆς μέσης πυκνότητος καὶ τῆς μεγίστης τιμῆς της στὸ κέντρο τῆς Γῆς τὸ ἐπόμενο βῆμα ἦταν νὰ συγκριθοῦν οἱ ποσότητες αὐτὲς μὲ τὶς πυκνότητες γνωστῶν ὀρυκτῶν καὶ στοιχείων. Ἐὰν δεχθοῦμε τὴν τιμὴ  $12\text{ gr/cm}^3$  ὡς κεντρικὴ πυκνότητα, αὐτὴ εἶναι 4,5 φορὲς μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν πυκνότητα τοῦ χαλαζία, ἢ 1,5 φορὲς μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν πυκνότητα τοῦ σιδήρου, σὲ συνθήκη πίεσης καὶ θερμοκρασίας. Ἡ τιμὴ αὐτὴ εἶναι πολὺ μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν πυκνότητα τοῦ ἀργύρου, σὲ ἐπιφανειακὲς συνθήκες, ἀλλὰ μικρότερη ἀπὸ αὐτὴ τοῦ χρυσοῦ. Ἡ ὑπαρξὴ πελώριου ὄγκου χρυσοῦ στὸ κέντρο τοῦ πλανήτη μας ἀποκλείσθηκε μόλις στὶς ἀρχὲς τοῦ 20οῦ αἰῶνα.

Ἐνα ἄλλο θέμα ποὺ ἀπασχόλησε τοὺς ἐπιστήμονες τοῦ 19ου αἰῶνα ἦταν ἡ θερμοκρασία στὸ κέντρο τῆς Γῆς. Ἀπὸ ἐργασίες σὲ ὀρυχεῖα ἦταν γνωστὸ ὅτι ἡ θερμοκρασία τῶν πετρωμάτων αὐξάνει μὲ τὸ βάθος. Σὲ ὀρυχεῖα μεγάλου βάθους ἡ θερμοκρασία τῶν πετρωμάτων γίνεται τόσο μεγάλη ποὺ κάμνει τὴν ἐργασία δυσχερῆ.

Οἱ πρώτες μετρήσεις αὐξήσεως τῆς θερμοκρασίας μὲ τὸ βάθος χρονολογοῦνται ἀπὸ τὸ 1870. Οἱ μετρήσεις γίνονταν κυρίως σὲ ὀρυχεῖα μεγάλου βάθους, ἢ σὲ γεωτρήσεις γιὰ ἀνέγερση ἀρτεσιανῶν ὑδάτων. Ἀπὸ τὶς μετρήσεις αὐτὲς βρέθηκε ὅτι ἡ θερμοκρασία τῆς Γῆς αὐξάνει κατὰ  $1^\circ$  Κελσίου περίπου κάθε 30 μέτρα βάθους. Ἐὰν ἡ θερμοκρασία αὐξανόταν μὲ τὸν ἴδιο ρυθμὸ καὶ στὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς, σὲ βάθος λ.χ. 500 χλμ. θὰ ἔπρεπε νὰ ὑπερβαίνει τοὺς  $10.000^\circ$  Κελσίου. Ἡ θερμοκρασία αὐτὴ εἶναι πολὺ μεγαλύτερη ἀπὸ αὐτὴ ποὺ ἐπικρατεῖ στὴν ἐπιφάνεια τοῦ Ἡλίου. Αὐτὸ ἔκανε τοὺς γεωφυσικοὺς νὰ δεχθοῦν ὅτι ὁ ρυθμὸς αὐξήσεως τῆς θερμοκρασίας δὲν εἶναι ὁμοιόμορφος. Μιὰ λογικὴ ἐξήγηση τῆς μὴ ὁμοιόμορφης αὐξήσεως τῆς θερμοκρασίας θὰ ἦταν ἡ ψύξη τῆς Γῆς ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια πρὸς τὰ μέσα, ἢ ἀπὸ τὸ κέντρο πρὸς τὰ ἔξω. Ἐτσι δημιουργήθηκε ἡ ἀποψη ὅτι ἡ στερεὰ Γῆ περικλείει σφαιρικὸ πυρῆνα ὑγρὸ, ἀνάμικτο

πιθανῶς μὲ ἰξώδη ἀέρια. Ἡ ἄποψη αὐτὴ ὑποστηρίχθηκε τὸ 1793 ἀπὸ τὸν Benjamin Franklin. Τὰ ἀέρια πιέζονται περισσότερο ἀπὸ τὰ μέταλλα· ἔτσι μποροῦν νὰ δικαιολογηθοῦν οἱ μεγάλες πικρότητες ποὺ εἶχαν προηγουμένως ὑπολογίσει γιὰ τὶς κεντρικὲς περιοχὰς τῆς Γῆς.



Εἰκ. 2. Τὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς κατὰ τὴν ἄποψη τοῦ Kraemer (1902). Ἡ Γῆ εἶχε τρεῖς φλοιούς: Ὁ στερεὸς φλοιὸς ὑποβαστάζεται ἀπὸ ἐλαστικὸ μανθῶν ποὺ περιβάλλει τὸν στερεὸ πυρήνα.

Τὸ 1902 δημοσιεύθηκε στὸ Βερολίνο ἀπὸ τὸν H. Kraemer βελτιωμένο σχέδιο γιὰ τὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς (βλ. εἰκ. 2). Στὸ σχέδιο αὐτὸ ὁ στερεὸς φλοιὸς ὑποβαστάζεται ἀπὸ ἐλαστικὸ μανθῶν ποὺ περιβάλλει κεντρικὸ στερεὸ πυρήνα. Ὁ ἐξωτερικὸς φλοιὸς ἀποτελεῖται, σύμφωνα μὲ τὶς γεωλογικὰς ἐνδείξεις, ἀπὸ στρώματα ποὺ ἔχουν διάφορες πικρότητες σὲ διάφορες περιοχὰς τῆς Γῆς. Τὸ ὑπόδειγμα αὐτὸ διαφέρει ἀπὸ τὸ προηγούμενο ὡς πρὸς τὴ φυσικὴ κατάσταση τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς, ἀλλὰ ὑστερεῖ αὐτοῦ ποὺ εἶναι δεκτὸ σήμερα.

Πρόσθετες ἐνδείξεις γιὰ τὴ θερμοκὴν κατάσταση ποὺ ἐπικρατεῖ στὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς ἔδωσαν οἱ μετρήσεις τῆς θερμοκρασίας τοῦ μάγματος καὶ τῶν ἀερίων ποὺ φθάνουν στὴν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς κατὰ τὶς ἠφαιστειακὰς ἐκρήξεις.

Ὁ Sir Humphry Dave ἀπέδωσε τὴν ἠφαιστειακὴ θερμότητα στὴν ὀξείδωση τῶν

ύλικῶν τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς. Ὁ μηχανικὸς *Robert Mallet*, πού εἶναι ἀπὸ τοὺς θεμελιωτὲς τῆς Σεισμολογίας, πίστευε ὅτι ἡ ἠφαιστειακὴ θεομότητα ὀφειλόταν στὴ θραύση τῶν πετρωμάτων κατὰ τὴ συστολὴ τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς λόγω τῆς μακροχρόνιας ψύξης του. Ἡ ἄποψη αὐτὴ υἱοθετήθηκε ἀπὸ πολλοὺς γεωλόγους καὶ γεωφυσικούς. Μέχρι καὶ τὸ 1970 ἀκόμη πολλοὶ πίστευαν ὅτι ὁ σχηματισμὸς τῶν ὀρέων καὶ τῶν ὠκεανίων λεκανῶν ὀφειλόταν σὲ συστολὴ τῆς Γῆς.

Ἡ θεωρία αὐτὴ ὑπέστη τὸ πρῶτο κτύπημα τὸ 1896, ὅταν ἀνακαλύφθηκε ἡ ραδιενέργεια ἀπὸ τὸ Γάλλο φυσικὸ *Henri Becquerel*. Ἀπὸ μετρήσεις βρέθηκε ὅτι ὅλα τὰ πετρώματα στὴ φυσικὴ τους κατάσταση περιέχουν μικρὰ ποσὰ ραδιενεργῶν στοιχείων. Ἡ διάσπαση τῶν στοιχείων αὐτῶν τροφοδοτεῖ τὴ Γῆ μὲ πρόσθετη θεομότητα πού ἐξουδετερώνει τὴ βαθμιαία ψύξη της. Πιστεύεται ὅτι λόγω τῆς ραδιενεργοῦ θέρμανσης τοῦ πλανήτη μας ἡ μέση θερμοκρασία του βρίσκεται σήμερα σὲ ἀνοδικὴ πορεία.

Γιὰ τὴ φυσικὴ κατάσταση τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς οἱ φυσικοὶ φιλόσοφοι τῆς προσεισμολογικῆς περιόδου κατέφυγαν στὶς ὠκεάνιες παλίρροιες πού δημιουργοῦνται ἀπὸ τὴν ἔλξη τοῦ Ἥλιου καὶ τῆς Σελήνης. Κατὰ τὸν *Sir William Thomson* (ἀργότερα λόρδο *Kelvin*), ἐὰν ἡ Γῆ ἦταν εὐκαμπτη, ἡ ἐπιφάνειά της θὰ παρακολουθοῦσε τὶς παλιρροϊκὲς κινήσεις τῶν ὠκεανίων ὑδάτων καὶ οἱ παλίρροιες δὲν θὰ ἦταν ὀρατές. Ἀπὸ τὰ ὕψη καὶ τὶς φάσεις τῶν ὠκεανίων παλιρροϊῶν εἶναι μαθηματικῶς δυνατὸ νὰ ὑπολογισθεῖ ἡ ἀκαμψία τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς. Κατὰ τὸ 1887 ὁ *George Darwin* (δευτερότοκος υἱὸς τοῦ *Charles Darwin*) μελετώντας τὶς παλίρροιες βρῆκε ὅτι ἡ ἀκαμψία τῆς Γῆς εἶναι σημαντικὴ, ἀλλὰ ὅχι τόσο μεγάλῃ ὅσο αὐτὴ τοῦ χάλυβα. Ἀπὸ τοὺς ὑπολογισμοὺς αὐτοὺς ὁ *Darwin* κατέληξε στὸ συμπέρασμα ὅτι ἡ γεωλογικὴ ὑπόθεση περὶ ὑπαρξης ἐσωτερικοῦ ὑγροῦ εἶναι ἀβάσιμη. Οἱ νεώτερες ἔρευνες ἔδειξαν ὅτι ἡ ἀκαμψία τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς πού εἶχε ὑπολογίσει ὁ *Darwin* ἦταν μερικῶς ὀρθή.

Οἱ χονδροειδεῖς ἐκτιμῆσεις τῶν πρώτων γεωφυσικῶν ἐργασιῶν δὲν ἐπέτρεπαν τὴν ἀποκάλυψη μικρότερων μεταβολῶν στὶς μηχανικὲς ιδιότητες τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς. Ἔτσι ὑπῆρχε εὐχέρεια γιὰ τὴν ὑποστήριξη ἀντιθέτων γνωμῶν ὡς πρὸς τὴ φυσικὴ κατάσταση τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς.

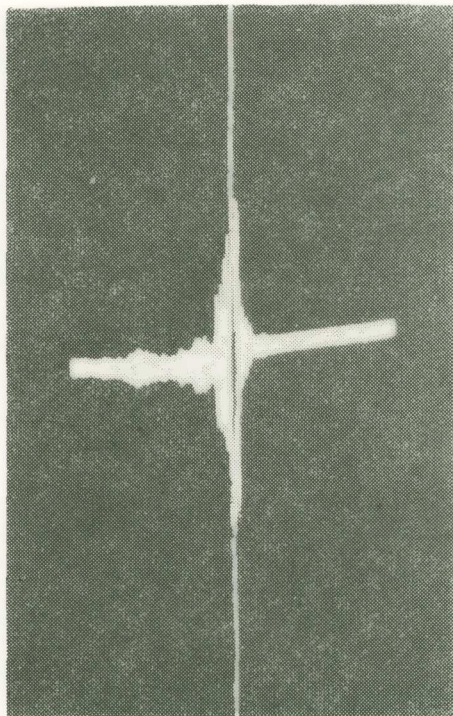
Τὰ ὑποδείγματα πού δέχονταν ἐσωτερικὸ ὑγρὸ ἢ πλαστικὸ στρώμα ὀδήγησαν στὴν ἄποψη ὅτι ὑπῆρχαν ρεύματα μεταφορᾶς ἰξώδους ὑλικοῦ ἀνάλογα πρὸς αὐτὰ πού παρατηροῦνται σὲ θερμαινόμενῃ χύτρα μὲ λάδι. Ἐπειδὴ ἡ ἄνοση σπρώχνει τὰ ἐλαφρότερα ὑλικά πρὸς τὴν ἐπιφάνεια, σκέφθηκαν ὅτι τὰ πυριτικὰ πετρώματα τοῦ φλοιοῦ θὰ ἦταν κατὰ μέσο ὄρο ἐλαφρότερα ἀπὸ τὰ πιθανῶς πλούσια σὲ σίδηρο πετρώματα τοῦ ὑποκείμενου στρώματος. Ἡ ἄποψη αὐτὴ ἐνισχύθηκε ἀπὸ παρατηρήσεις σχημα-

τισμοῦ στερεοῦ φλοιοῦ ἐπὶ ἰξώδους διαπύρου μάγματος σὲ λίμνες λάβας τοῦ Βεζουβίου καὶ τοῦ Κίλαυα.

Ἡ ὑπαρξη ρευμάτων μεταφορᾶς στὸ ἄνω μέρος τῆς Γῆς δὲν ἔγινε ἀποδεκτὴ κατὰ τὸ πρῶτο ἡμισυ τοῦ 20οῦ αἰώνα. Ἀντίθετα υἱοθετήθηκε ἡ ἄποψη ὅτι ὑπάρχουν ρεύματα μεταφορᾶς στὸν πυρήνα. Τελευταῖα, πάντως, ἐπανῆλθε στὸ προσκήριο ἡ ἄποψη ὅτι λαμβάνει χώρα πολὺ βραδεία μεταφορὰ πλαστικοῦ ὕλικου στὸν ἀνώτερο μανδύα.

Οἱ ἀντιμαχόμενες ἀπόψεις γιὰ τὴ δομὴ τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς συνεχίστηκαν μέχρι τὶς ἀρχὲς τοῦ σεισμολογικοῦ αἰώνα. Ἀπὸ τὸ 1883 ὁ Ἄγγλος σεισμολόγος John Milne εἶχε διατυπώσει στὴν Ἰαπωνία τὴν ἄποψη ὅτι κάθε μεγάλος σεισμός θὰ μπορούσε μὲ κατάλληλα ὄργανα νὰ ἀναγραφεῖ πιθανῶς σὲ ὁποιοδήποτε σημεῖο τῆς Γῆς. Ἡ πρόβλεψη αὐτὴ ἐπαληθεύθηκε, ὅταν ὁ E. Von Rebeur-Paschwitz, μετρώντας τὴ βαρύτητα, μὲ ἐκπληξη παρατήρησε τὴ σύμπτωση τοῦ χρόνου ἀναγραφῆς ἰδιωτύπων κυμάτων ἀπὸ ὀριζόντια εὐαίσθητα ἐκκρεμῆ στὸ Potsdam καὶ Wilhemshaven μὲ τὸ χρόνο παρατήρησης μεγάλου σειμοῦ στὸ Τόκιο. Οἱ ἐδαφικὲς διαταράξεις πὸν σημειώθηκαν στὴ Γερμανία στὶς 2 ὥρες καὶ 7 λεπτὰ τῆς 18 Ἀπριλίου 1889 ἀποδόθηκαν ἀμέσως στὸν ἰαπωνικὸ σεισμό (βλ. εἰκ. 3). Ἀπὸ τὴ στιγμή αὐτὴ ἀρχίζει καὶ ὁ σεισμολογικὸς αἰώνας.

Ἀπὸ σειρά ἐγγραφῶν μακρινῶν σεισμῶν πὸν παρουσιάστηκαν τὸ 1897 ἀπὸ τὸν R. D. Oldham, προοιστάμενο τῆς Γεωλογικῆς ὑπηρεσίας τῶν Ἰνδιῶν, ἀποδείχθηκε ὅτι οἱ σεισμικὲς διαταράξεις ἀποτελοῦνται ἀπὸ τρεῖς ἀλληπάλληλες σειρὲς κυμάτων. Ἀπὸ τὶς σειρὲς αὐτὲς οἱ δύο πρῶτες εἶχαν μικρὰ πλάτη, ἡ δὲ τρίτη ἀποτελοῦνταν ἀπὸ «μεγάλια κύματα». Βασιζόμενος στὴ διάκριση αὐτὴ ὁ Milne χαρτογράφησε τοὺς χρόνους πὸν εἶχαν δαπανήσει οἱ τρεῖς ομάδες τῶν σεισμικῶν κυμάτων γιὰ νὰ φθάσουν ἀπὸ τὸν τόπο γένεσης διαφόρων σεισμῶν μέχρι τὸν τόπο ἀναγραφῆς των σὲ συνάρτηση μὲ τὴν ἀπόσταση πὸν εἶχαν διατρέξει. Ἀπὸ τὴ χαρτογράφηση αὐτὴ καὶ τὸ χρονικὸ διάστημα πὸν προηγούνταν οἱ εἰσαγωγικοὶ παλμοὶ τῶν μεγάλων κυμάτων ἦταν δυνατό, ὅπως ὑποδείχθηκε ἀπὸ τὸν Milne, νὰ καθορισθεῖ μὲ προσέγγιση ἡ ἀπόσταση τοῦ τόπου προέλευσης ὁποιοδήποτε σειμοῦ ἀπὸ τὸν τόπο ἀναγραφῆς του. Ἐὰν ἦταν γνωστὲς οἱ ἀποστάσεις αὐτὲς ἀπὸ τρεῖς ἢ περισσότερους τόπους ἀναγραφῆς, τότε θὰ ἦταν δυνατό νὰ καθορισθεῖ καὶ ἡ ἐπικεντρικὴ περιοχὴ. Ὁ καθορισμὸς μπορεῖ νὰ γίνει μὲ χάραξη ἐπὶ γήινης σφαιρας τόξων μὲ κέντρο τὸν τόπο ἀναγραφῆς καὶ ἀκτῖνα τὴν ἀπόστασή του ἀπὸ τὸν τόπο προέλευσης τοῦ σειμοῦ. Ἡ τομὴ τῶν τόξων αὐτῶν ἦταν κατὰ προσέγγιση ἡ ἐπικεντρικὴ θέση τοῦ σειμοῦ. Μὲ τὴν τεχνικὴ αὐτὴ ἐπιτεύχθηκε ἡ ταχεία σύνταξη τῶν πρώτων παγκοσμίων σεισμικῶν καταλόγων καὶ τῶν πρώτων παγκοσμίων χαρτῶν σεισμικότητας.

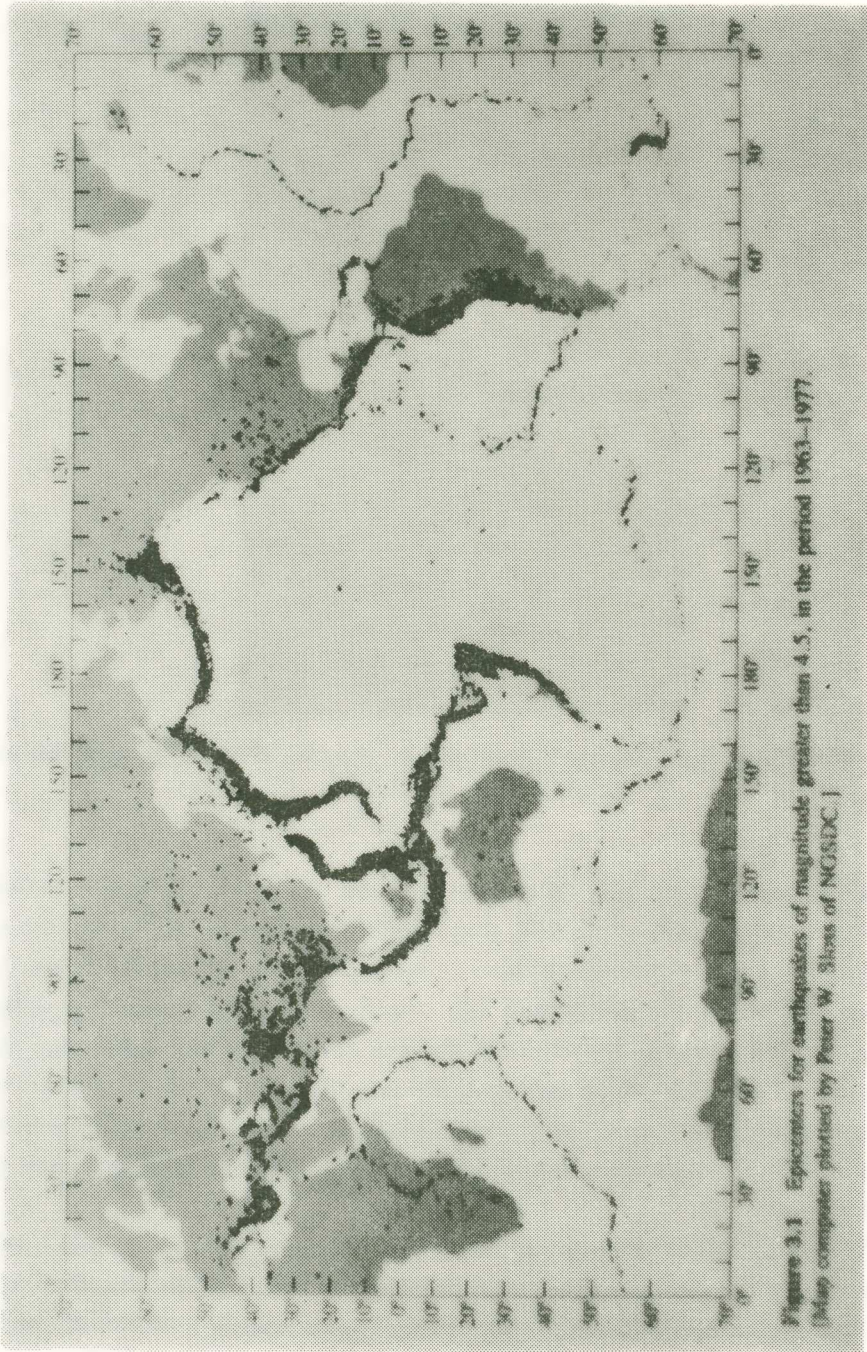


Εἰκ. 3. Ἡ πρώτη ἀναγραφὴ μακροῦ σεισμοῦ στὶς 18 Ἀπριλίου 1889 στὸ Potsdam, ἀπὸ τὸν E. von Rebeur - Paschwitz.

Οἱ σημερινὲς ἀπόψεις γιὰ τὴ γεωδυναμικὴ καὶ πλαστικὴ, εὐήλατο, ἐλαστικὴ καὶ εἰθραστο παραμόρφωση τῆς Γῆς εἶναι προῖόν τῶν μελετῶν τῆς σεισμικότητος ὁλοκλήρου τῆς Γῆς. Τὰ ὄρια τῶν μεγάλων τεκτονικῶν πλακῶν ἐμφανίσθηκαν ἀπὸ τὶς σεισμικὲς λωρίδες πὸν τὶς περιβάλλον (βλ. εἰκ. 4). Ἀπὸ τὶς μελέτες αὐτὲς ρίφθηκε φῶς, κατὰ τὰ μέσα τῆς δεκαετίας τοῦ '60, στὰ προβλήματα τῆς ὀρογένεσης, τῆς διεύρυνσης τοῦ ὠκεανίου φλοιοῦ καὶ τῆς προέλευσης τῶν τάσεων πὸν ἀσκοῦνται στὶς τεκτονικὲς πλάκες πὸν ἀπαρτίζουσι τὸ στερεὸ φλοιὸ τῆς Γῆς. Οἱ σεισμοὶ θεωροῦνται σήμερον προῖόν τῶν παραμορφώσεων πὸν ὑφίστανται οἱ τεκτονικὲς πλάκες κατὰ τὴ μετάθεσίν των.

Τὸ 1900 ὁ Oldham βρῆκε ὅτι οἱ «εἰσαγωγικοὶ παλμοὶ» ὀδεύουσι διὰ μέσον τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς, ἐνῶ τὰ «μεγάλὰ κύματα» διαδίδονται κοντὰ στὴν ἐπιφάνειά της. Τὰ πρῶτα καὶ τὰ δευτέρω κύματα τῶν «εἰσαγωγικῶν παλμῶν» παρέστησε χάριν συντομίας μὲ τὰ γράμματα P καὶ S ἀπὸ τὰ ἀρχικὰ τῶν λέξεων Primae καὶ Secundae. Ἡ διάκριση αὐτὴ ἀποτέλεσε ἀποφασιστικὸ βῆμα γιὰ τὴ σεισμολογικὴ ἀκτινοσκοπή-

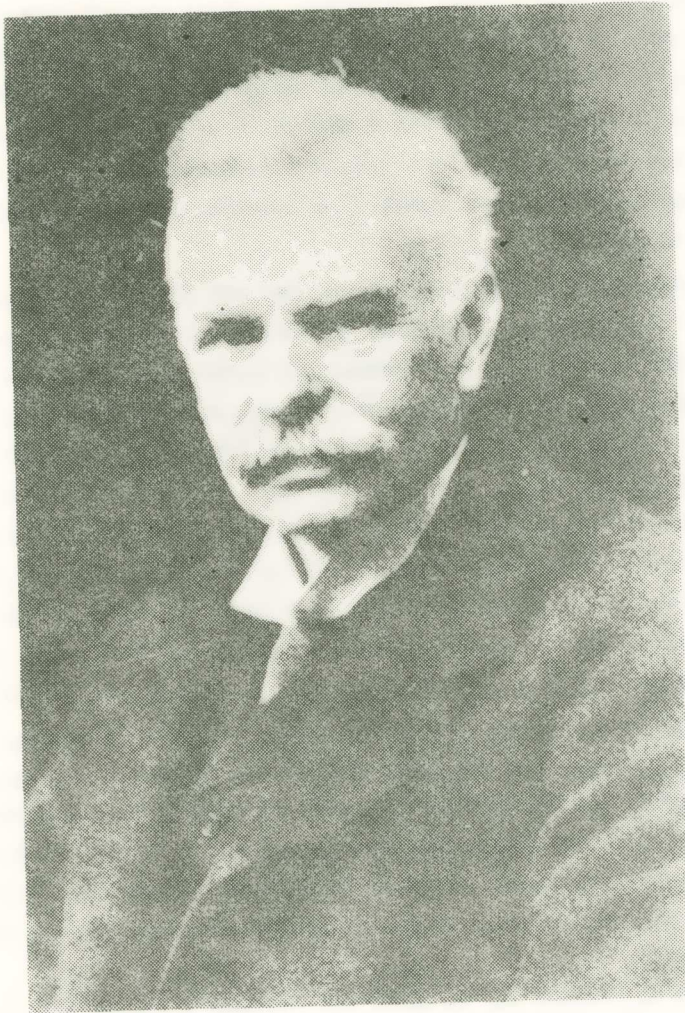




Είγ. 4. Σεισμικές λογίδες από έπικέντρα σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο από 4,5 κατά την περίοδο 1963 - 1977.

ση τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς. Τὸ 1906, τὴ χρονιά τοῦ μεγάλου σεισμοῦ τοῦ Ἁγίου Φραγκίσκου — πὸν ἔγινε καὶ αὐτὸς στὶς 18 Ἀπριλίου — ὁ Oldham (βλ. εἰκ. 5) παρουσίασε τὴν πρώτη ἀκτινοσκοπικὴ ἐνδειξη ὅτι ἡ Γῆ ἔχει μεγάλο πυρήνα. Ἡ ἀνακάλυψη τοῦ Oldham ἔγινε μὲ ἐπιχειρηματολογία, ἡ ὁποία, σὲ γενικὲς γραμμές, χρησιμοποιεῖται ἀκόμη καὶ σήμερον γιὰ τὴν ἀνίχνευση ἐπιφανειῶν ἀσυνεχείας στὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς. Στὶς ἐπιφάνειες ἀσυνεχείας ἀλλάσσον ἀπότομα ἡ πυκνότητα καὶ οἱ ἐλαστικὲς ιδιότητες τῶν ὀλικῶν τῆς Γῆς.

Στὸ σημεῖο αὐτὸ θὰ πρέπει νὰ λεχθεῖ ὅτι εἶναι προτιμότερον νὰ μετροῦμε τὶς ἀποστάσεις μεταξὺ δύο τόπων ἀπὸ τὴν κεντρικὴ γωνία πὸν σχηματίζεται ἀπὸ τὶς



Εἰκ. 5. Richard Dixon Oldham (1858 - 1936).

γίνετες ακτίνες πού διέρχονται από αυτούς, και όχι από τήν απόστασή τους ἐπὶ τῆς ἐπιφάνειας τῆς Γῆς. Ἀπὸ τὶς ἀναγραφὰς μεγάλων σεισμῶν ὁ Oldham παρατήρησε ὅτι τὰ δευτέρα κύματα ἀναγράφονται μέχρι 105° περίπου ἀπὸ τὸν τόπο ἀναχώρησής των. Μέχρι τὴν ἀπόσταση αὐτὴ ἡ χαρτογράφηση τῶν χρόνων διαδρομῆς τῶν κυμάτων αὐτῶν σὲ συνάρτηση μὲ τὴ γωνιώδη ἀπόσταση μεταξὺ τῶν τόπων ἀναγραφῆς καὶ τοῦ τόπου προέλευσης παρέχει ὁμαλὴ καμπύλη. Μεταξὺ 105° καὶ 120° δὲν παρατηροῦνται τὰ δευτέρα κύματα καὶ στὴν ἀπόσταση τῶν 130° ὁ χρόνος ἀφίξις των εἶναι κατὰ 10 λεπτὰ περίπου μικρότερος αὐτοῦ πού ἀναμένεται ἀπὸ τὴν προέκταση τῆς καμπύλης πού σχηματίζεται ἀπὸ τοὺς χρόνους ἀφίξις των μέχρι τὴν ἀπόσταση τῶν 105° περίπου. Ὁ Oldham ἀπέδωσε τὴν καθυστέρηση αὐτὴ στὴν εἴσοδο τῶν δευτέρων κυμάτων σὲ ἓνα κεντρικὸ πυρήνα, ὅπου ἡ ταχύτητα μετάδοσής των ἦταν τὸ 1/2 αὐτῆς πού εἶχαν στὸ περιβάλλον στρωῶμα. Μὲ τὴν ἐκδοχὴ ὅτι οἱ τροχιᾶς τῶν κυμάτων εἶναι εὐθεῖες, ὁ Oldham προχώρησε στὴν ἐκτίμηση τοῦ μεγέθους τοῦ πυρήνα. Ἡ ἐκδοχὴ, ὅτι οἱ τροχιᾶς τῶν κυμάτων εἶναι εὐθεῖες, δηλαδὴ χορδές, δὲν ἀληθεύει. Οἱ σεισμικῆς ἀκτίνες εἶναι καμπύλες μὲ τὸ κυρτὸ τους μέρος πρὸς τὸ κέντρο τῆς Γῆς.

Ἡ ἐκτίμηση τοῦ μεγέθους τοῦ πυρήνα ἀπὸ τὸν Oldham βασίσθηκε στὸ σκεπτικόν: (1) Ὅτι ὁ πυρήνας διαπερᾶται ἀπὸ κυματικῆς τροχιᾶς πού ἀναδύονται σὲ ἀπόσταση 120° καὶ (2) ἡ μεγάλη ἐλάττωσις τῆς ταχύτητος τῶν κυμάτων πού ἀναδύονται στὴν ἀπόσταση τῶν 150° δείχνει ὅτι οἱ τροχιᾶς των ἔχουν εἰσχωρήσει σὲ μεγάλο βάθος ἐντὸς τοῦ πυρήνα. Ἐπειδὴ τὸ μεγαλύτερο βάθος τῆς χορδῆς πού φθάνει στὶς 120° εἶναι τὸ 1/2 τῆς ἀκτίνας τῆς γήινης σφαίρας, δέχθηκε ὅτι ὁ πυρήνας δὲν ἐκτείνεται πέρα τῶν 0,4 τῆς ἀκτίνας τῆς Γῆς. Ἡ σημερινὴ ἄποψη εἶναι ὅτι τὰ δευτέρα κύματα πού ἀναδύονται στὴν ἀπόσταση τῶν 120° εἶναι ἐγκάρσια κύματα πού φθάνουν διὰ μέσου τοῦ μανδύα κατόπιν ἀνάκλασης στὴν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς. Ἀντίθετα πρὸς τὴν ἄποψη πού ἐπικρατεῖ σήμερον, ὁ Oldham ἀπέρριψε τὴν ὑπόθεση ὅτι τὰ ἐγκάρσια κύματα ἀποσβένονται μέσα στὸν πυρήνα καὶ ὅτι ὁ πυρήνας μπορεῖ νὰ εἶναι ὑγρός.

Ἡ πρώτη ἐκτίμηση τῆς ἀκτίνας τοῦ πυρήνα σὲ 0,4R τῆς ἀκτίνας τῆς Γῆς ἢ 2550 χλμ. βελτιώθηκε στὴ Γερμανία τὸ 1914 ἀπὸ τὸν Beno Gutenberg (βλ. εἰκ. 6). Ὁ Gutenberg — πού γεννήθηκε τὸ χρόνον πού ἄρχισε ὁ σεισμολογικὸς αἰώνας, 1889 — βασιζόμενος σὲ μεγαλύτερον πλῆθος κυματικῶν χρόνων ὑπολόγισε ὅτι ἡ πυρηνικὴ ἐπιφάνεια βρῖσκεται σὲ βάθος 0,545R τῆς ἀκτίνας τῆς Γῆς ἢ 2900 χλμ. Ἡ τιμὴ πού εἶναι σήμερον δεκτὴ ἀπέχει μόλις λίγα χιλιόμετρα ἀπὸ τὴν ἀρχικὴν τιμὴν τοῦ Gutenberg.

Μετὰ τὴ δημοσίευση τῆς ἐργασίας τοῦ Oldham, ἡ σπουδὴ τῶν εἰσαγωγικῶν κυμάτων ἔδειξε ὅτι πέραν τῶν 105° ὑπάρχει σκιερὴ ζώνη στὴν ὁποία τὰ εἰσαγωγικὰ



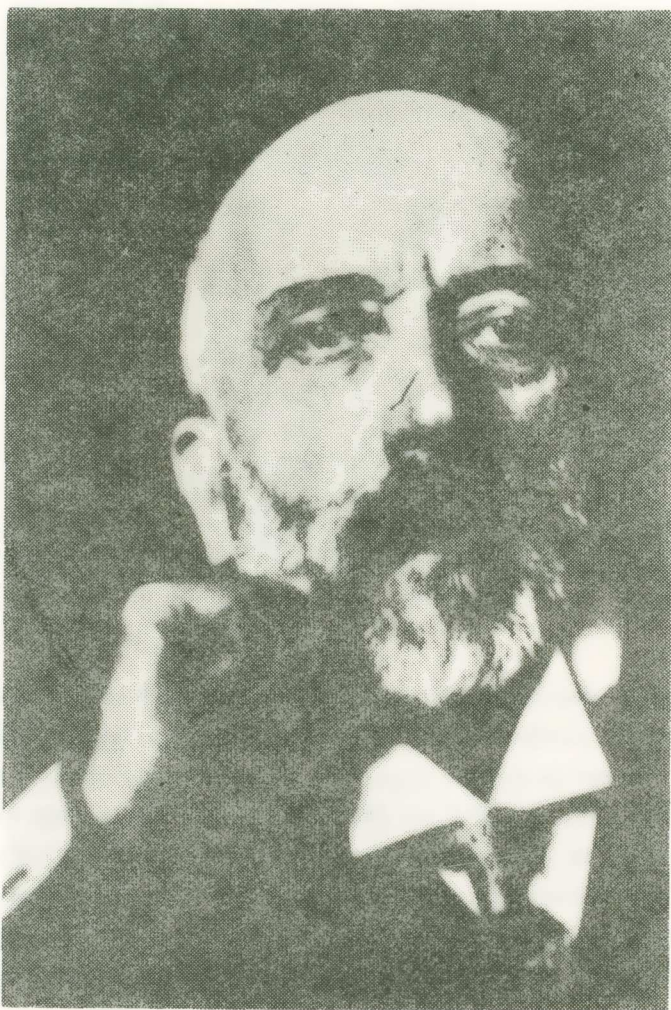
Εἰκ. 6. Beno Gutenberg (1889 - 1960).

κύματα λείπουν ἢ εἶναι πολὺ ἀσθενῆ. Πέραν ὅμως τῶν  $142^\circ$  τὰ πρῶτα κύματα εἶναι καὶ πάλι σχετικῶς μεγάλα, ἀλλὰ φθάνουν μὲ καθυστέρηση μερικῶν λεπτῶν. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι ὁ κεντρικὸς πυρήνας σχηματίζει γιὰ κάθε σεισμὸ σκιερὴ ζώνη πὸ περιβάλλει τὴ Γῆ μεταξὺ τῶν  $105^\circ$  καὶ  $142^\circ$  ἀπὸ τὸν τόπο ἀναχώρησης τῶν κυμάτων. Μία τέτοια ἀπόσβεση τῶν εἰσαγωγικῶν κυμάτων εἶχε γίνῃ δεκτὴ μὲ τὴν ὑπόθεση τοῦ Oldham ὅτι στὸν κεντρικὸ πυρήνα, ἡ ταχύτητα τῶν κυμάτων εἶναι κατὰ τὸ  $1/2$  μικρότερη ἀπὸ αὐτὴ πὸ παρατηρεῖται στὸ περιβάλλον στρωμα. Τὰ σεισμικὰ κύματα πὸ εἰσέρχονται στὸν πυρήνα ὑφίστανται σημαντικὴ διάθλαση ἀνάλογη πρὸς αὐτὴ πὸ ὑφίσταται τὸ φῶς ὅταν διέρχεται ἀπὸ συγκεντρωτικὸ φακὸ.

Ἐξίσου σημαντικὴ ὑπῆρξε ἡ παρατήρηση πὸ ἔγινε κατὰ τοὺς πρώτους χρόνους

τῆς ἐνόργανης Σεισμολογίας, ὅτι τὰ ἐγκάρσια κύματα ὀδεύουν διὰ μέσου ὅλων τῶν μερῶν τοῦ λίθινου φλοιοῦ καὶ τοῦ ὑποκείμενου στρώματος μέχρι τὸν πυρήνα. Τὰ κύματα αὐτὰ δὲν διέρχονται ἀπὸ ὕλικά ποῦ δὲν παρουσιάζουν ἀντίσταση στὴ μεταβολὴ τοῦ σχήματός των. Ἔτσι ἡ ἀναγνώριση ἀμφοτέρων τῶν εἰσαγωγικῶν κυμάτων μέχρι τὴν ἀπόσταση τῶν 105° θεωρήθηκε ὡς ἰσχυρὸ ἐπιχείρημα ὑπὲρ τῆς ἄποψης ὅτι τὸ ἐξωτερικὸ μέρος τῆς Γῆς εἶναι στερεό.

Οἱ ἀναγραφῆς μακρινῶν σεισμῶν δείχνουν ἐξασθένηση τῆς κυματικῆς ἐνέργειας καὶ μεγάλη χρονικὴ καθυστέρηση στὴν ἄφιξη τῶν πρώτων κυμάτων πέραν τῶν 105°, ἐπὶ πλέον εἶναι πολὺ ἀμφίβολο εἰὰ τὰ δεύτερα κύματα ἀναγράφονται πέραν τῆς ἀπό-



Εἰκ. 7. Andrija Mohorovičić (1857 - 1936).

στασης αὐτῆς. Ἡ παρατήρηση αὐτὴ θεωρήθηκε ὡς σαφῆς ἐνδειξη ὅτι ὁ κεντρικὸς πυρήνας εἶναι ὕγρὸς, ἢ τουλάχιστον συμπεριφέρεται ὡς ὕγρὸς.

Κατὰ τὴν πρώτη δεκαετία τοῦ λήγοντα αἰώνα ἔγινε καὶ ἄλλη ἀξιόλογη ἀνακάλυψη ποὺ ἀναφέρεται στὸ φλοιὸ τῆς Γῆς. Τὸ 1909 ὁ Γιουγκοσλάβος *Andrija Mohorovičić* (βλ. εἰκ. 7) βρῆκε στὸ Zagreb πειστικὴ ἀπόδειξη γιὰ τὴν ὕπαρξη ὀρικῆς ἐπιφάνειας ποὺ χωρίζει τὰ πετρώματα τοῦ ἐξωτερικοῦ φλοιοῦ ἀπὸ τὸ ὑποκείμενο στρώμα ποὺ τώρα ὀνομάζεται μανδύας. Ὁ Mohorovičić, ἀκολουθώντας τὴ μέθοδο τοῦ Oldham, χαρτογράφησε τοὺς χρόνους διαδρομῆς τῶν πρώτων κυμάτων γειτονικῶν σεισμῶν σὲ συνάρτηση μὲ τὴν ἀπόσταση ποὺ εἶχαν διανύσει μέχρι τὸ Zagreb. Ἀπὸ τὴ χαρτογράφηση αὐτὴ προέκυψε καμπύλη, ἢ ὁποία παρουσιάζει ἀπότομη κάμψη σὲ ἀπόσταση 200 χλμ., ἢ γωνιώδη ἀπόσταση 2<sup>ο</sup> περίπου. Ὁ Mohorovičić ἀπέδωσε τὴν κάμψη αὐτὴ σὲ ἀπότομη μεταβολὴ τῶν ἐλαστικῶν ἰδιότητων τῶν πετρωμάτων σὲ βάθος 50 χλμ. Μετ' ἀγενέστερες ἐργασίες ἀπὸ ἄλλους σεισμολόγους ἔδειξαν ὅτι ἡ μεταβολὴ αὐτὴ παρατηρεῖται σ' ὅλη τὴ Γῆ, ἀλλὰ σὲ διάφορα βάρη. Τὸ ὄριο ποὺ χωρίζει τὸν ἐξωτερικὸ φλοιὸ ἀπὸ τὸ μανδύα ὀνομάζεται ἀσυνέχεια Mohorovičić, ἢ γιὰ λόγους συντομίας ἐπιφάνεια Moho. Στὴν ὀρικὴ ἐπιφάνεια ποὺ χωρίζει τὸ μανδύα ἀπὸ τὸν πυρήνα δόθηκε τὸ ὄνομα τοῦ Gutenberg.

Ἀπὸ τὴν ἡμέρα ποὺ ἀναγνωρίσθηκε ἡ πρώτη ἀναγραφή ἰαπωνικοῦ σειсмоῦ σὲ ἀπόσταση 90<sup>ο</sup> περίπου ἀπὸ τὴν Εὐρώπη, συντελέσθηκε σὲ διάστημα 25 μόνον ἐτῶν λαμπρὸ καὶ θεμελιῶδες ἔργο ποὺ κατέληξε στὸν πρῶτο ἀκριβῆ καθορισμὸ τῆς ἐσωτερικῆς δομῆς τοῦ πλανήτη μας. Ὁ Oldham (1906), ὁ Mohorovičić (1909), καὶ ὁ Gutenberg (1914) ὑπῆρξαν οἱ πρῶτοι διάσημοι ἐργάτες ποὺ ἄφησαν ἀνεξίτηλα ἴχνη στὴν ἱστορία τοῦ σεισμολογικοῦ αἰώνα ποὺ συμπληρῶνεται στίς 18 Ἀπριλίον 1989. Τὰ ὀνόματα τῶν σκαπανέων αὐτῶν θὰ κοσμοῦν πάντοτε τὸ σεισμολογικὸ Πάνθεο. Εἶναι περίεργο παρατηρεῖ ὁ Bruce C. Bolt, καθηγητῆς στὸ Berkeley, ὅτι τὸ βραβεῖο Nobel, ποὺ καθιερώθηκε γιὰ τὴ φυσικὴ τὸ 1901, δὲ δόθηκε ἀκόμη γιὰ τίς ἀνακαλύψεις τῆς ἐσωτερικῆς δομῆς τοῦ πλανήτη μας, ἂν καὶ τοῦτο δόθηκε ἐπανειλημμένα γιὰ τίς ἀνακαλύψεις τῆς ἐσωτερικῆς δομῆς στὸ μικρόκοσμο τοῦ ἀτόμου. Οἱ ἄνθρωποι, ἐκ φύσεως, ἐλάχιστα ἐνδιαφέρονται γιὰ ὅ,τι συμβαίνει κάτω ἀπὸ τὰ πόδια τους.

Σεισμολόγοι συνεχίζοντας τὸ ἔργο τοῦ R.D. Oldham παρατήρησαν ὅτι τὰ πρῶτα κύματα ποὺ ἔχουν διέλθει τὸ μανδύα καὶ τὸν πυρήνα εἶναι δυνατὰ, ὑπὸ εὐνοϊκῆς συνθήκης, ν' ἀναγραφοῦν σὲ ἀποστάσεις μικρότερες τῶν 142<sup>ο</sup>. Ὁ ἀσθενὴς αὐτὸς φωτισμὸς στὴν περιοχὴ τῆς σκιᾶς τοῦ πυρήνα ἀποδόθηκε σὲ παράθλαση σεισμικῶν ἀκτίνων, ἀνάλογη μ' αὐτὴ ποὺ παρατηρεῖται ὅταν προσπίπτει φωτεινὴ δέσμη σ' αἰχμηρὸ ἀντικείμενο.

Τὸ 1936 ἡ νεαρὴ τότε Δανίδα σεισμολόγος *Inge Lehmann*—ποὺ ὑπερέβη ἤδη



Εἰκ. 8. Inge Lehmann (Γερ. 1888).

κατὰ ἓνα χρόνον τὸν σεισμολογικὸ αἰῶνα, 1888 —(βλ. εἰκ. 8), ἔπειτα ἀπὸ πολὺ σκέψη ἀπέρριψε τὴν ἐρμηνεῖα αὐτὴ καὶ ἀπέδωσε τὸ κύμα πὸν παρατηρεῖται στὴν πυρηνικὴ σκιὰ σὲ ἀνάκλαση σεισμικῆς ἀκτίνης ἀπὸ ἀπότομη ἀσυνέχεια πὸν βρίσκεται μέσα σ' αὐτὸ τοῦτο τὸν πυρήνα. Στὴν τολμηρὴ αὐτὴ ἐρμηνεῖα κατέληξε ἡ Lehmann μὲ τὴν ἀποδοχὴ, κατὰ τὸ πρότυπον τοῦ Oldhan, ὑποδείγματος γήινης σφαίρας, ὅπου τὰ P κύματα ἔχουν σταθερὴ ταχύτητα, 10 km/sec στὸ μανδύα καὶ 8 km/sec στὸν πυρήνα. Οἱ τιμὲς αὐτές, σύμφωνα μὲ τὰ τότε σεισμικὰ δεδομένα, ἦταν οἱ μέσες τιμὲς γιὰ τὶς περιοχὰς αὐτές. Ἡ Lehmann δέχθηκε ἀκόμη τὴν ὑπαρξὴ μικροῦ κεντρικοῦ πυρή-

να, ὅπου πάλι ἡ ταχύτητα τῶν πρώτων κυμάτων εἶναι σταθερή, ἀλλὰ ἐλαφρῶς μεγαλύτερη τῆς ταχύτητας πού ἔχουν στὸν ἐξωτερικὸ ὕγρὸ πυρήνα. Οἱ ἀπλοποιήσεις αὐτὲς τῆς ἐπέτρεψαν νὰ θεωρήσει τὶς σεισμικὲς ἀκτίνες ὡς εὐθεῖες γραμμές, δηλαδή ὡς χορδὲς τῆς γήινης σφαίρας. Ἔτσι μποροῦσαν μὲ στοιχειώδη τριγωνομετρία νὰ ὑπολογίστουν πολλὰ εὐκόλα οἱ χρόνοι πού χρειάζονται τὰ πρώτα κύματα νὰ διανύσουν τοὺς κλάδους τῆς τροχιάς των πού βρίσκονται στὸ μανδύα καὶ στὸν ἐξωτερικὸ καὶ ἐσωτερικὸ πυρήνα. Μὲ διαδοχικὲς τροποποιήσεις τῆς ἀκτίνας τοῦ ἐσωτερικοῦ πυρήνα καὶ τῆς ταχύτητας τῶν κυμάτων ἐντὸς αὐτοῦ ἡ Lehmann ἔδειξε ὅτι ἦταν δυνατὸ νὰ βρεθεῖ ὑπόδειγμα ἐσωτερικοῦ πυρήνα πού νὰ ἐπαληθεύει τὸ χρόνο διαδρομῆς τῶν κυμάτων πού ἐμφανίζονται στὴν πυρηνικὴ σκιά.

Μὲ τὸ ὑπόδειγμα αὐτὸ ἡ Lehmann δὲν ἀπέδειξε ἀπ' εὐθείας τὴν ὑπαρξὴ ἐσωτερικοῦ πυρήνα ἀλλὰ τὴ δυνατότητα ὑπαρξῆς του. Στὴν πραγματικότητα θὰ μποροῦσε νὰ ὀριστεῖ καὶ ἄλλη δομὴ τῆς Γῆς ἀπὸ 3 φλοιοὺς πού θὰ ἐξηγοῦσε ἱκανοποιητικὰ τὰ χαρακτηριστικὰ τῶν παρατηρουμένων πυρηνικῶν κυμάτων. Ἡ Lehmann, πάντως, ὑπέδειξε ὅτι ἡ παρατήρηση πυρηνικῶν κυμάτων στὸ *Irksk*, σὲ ἀπόσταση 110.8°, δηλαδή σὲ μεγάλη ἀπόσταση ἀπὸ τὰ σημεῖα τῶν 105° καὶ 142° πού ὀρίζουν τὸ εὖρος τῆς σκιάς τοῦ πυρήνα δὲν μποροῦσε νὰ ἐξηγηθεῖ ἱκανοποιητικὰ μὲ τὴν ἰσχύουσα ὑπόθεση περὶ σεισμικῆς παρᾶθλασης στὴν ἐπιφάνεια τοῦ κεντρικοῦ πυρήνα.

Ἡ ἀνακάλυψη τοῦ ἐσωτερικοῦ πυρήνα ἀπὸ τὴν Inge Lehmann εἶναι περισσότερο ἐντυπωσιακὴ ἀπὸ τὴν ἀνακάλυψη λ.χ. νέου κομήτη ἢ μακρινῆς χώρας. Ἡ Lehmann στὴν ἐργασία της μὲ τὸν τίτλο «P'», τὸν μικρότερο τίτλο πού ἔχει δημοσιευθεῖ σεισμολογικὴ ἢ ὁποιαδήποτε ἄλλη ἐπιστημονικὴ ἐργασία, σημείωσε μὲ μεγάλη προσοχὴ ὅτι δὲν εἶχε ἀποδείξει τὴν ὑπαρξὴ ἐσωτερικοῦ πυρήνα. Πράγματι, μὲ ἀσθηρὰ κριτήρια, ποτὲ δὲν μπορεῖ μὲ σεισμικὰ μέσα νὰ ἀποδειχθεῖ κατὰ τρόπο ἀναντίρρητο ἡ ὑπαρξὴ ἐσωτερικῆς δομῆς πού εἶναι ἀπρόσιτη στὴν ἄμεση παρατήρηση. Ἡ ἐργασία της, πάντως, ἐντυπωσίασε στὶς Ἠνωμένες Πολιτεῖες τὸ διάσημο σεισμολόγο *Benjo Gutenberg*—πού εἶχε φύγει ἀπὸ τὴν Γοττίνγη τὸ 1930—καὶ στὴν Ἀγγλία τὸν ὁμόλογό του *Sir Harold Jeffreys, F.R.S.* (βλ. εἰκ. 9)—γεννήθηκε 2 χρόνια ἀργότερα ἀπὸ τὸν *Gutenberg*, 1891). Ἀμφότεροι, καὶ ἀνεξάρτητα ὁ ἓνας ἀπὸ τὸν ἄλλο, πέτυχαν μὲ μεγάλο πλῆθος χρόνων διαδρομῆς πυρηνικῶν κυμάτων νὰ ὑπολογίσουν, μέσα σὲ δύο χρόνια, τὴν ἀκτίνα τοῦ ἐσωτερικοῦ πυρήνα καὶ τὴ διανομὴ τῆς ταχύτητας τῶν πυρηνικῶν κυμάτων ἐντὸς αὐτοῦ. Ἡ ἀνακάλυψη τῆς Inge Lehmann ἐπιβεβαιώθηκε τὸ 1970 μὲ τὴν παρατήρηση κυμάτων ἐξ ἀνακλάσεως ἀπὸ ὑπόγεια πυρηνικὴ ἔκρηξη στὴν ἐξωτερικὴ ἐπιφάνεια ἐσωτερικοῦ πυρήνα ἀκτίνας 1216 χλμ. περίπου (βλ. εἰκ. 10). Ἔτσι μὲ συνδυασμὸ ἀμέσων καὶ ἐμμέσων ὑπολογισμῶν ἐπιτεύχθηκε ὁ ἐντοπισμὸς καὶ τρίτης μεγάλης ἀσυνέχειας μέσα στὴ γήινη σφαίρα.

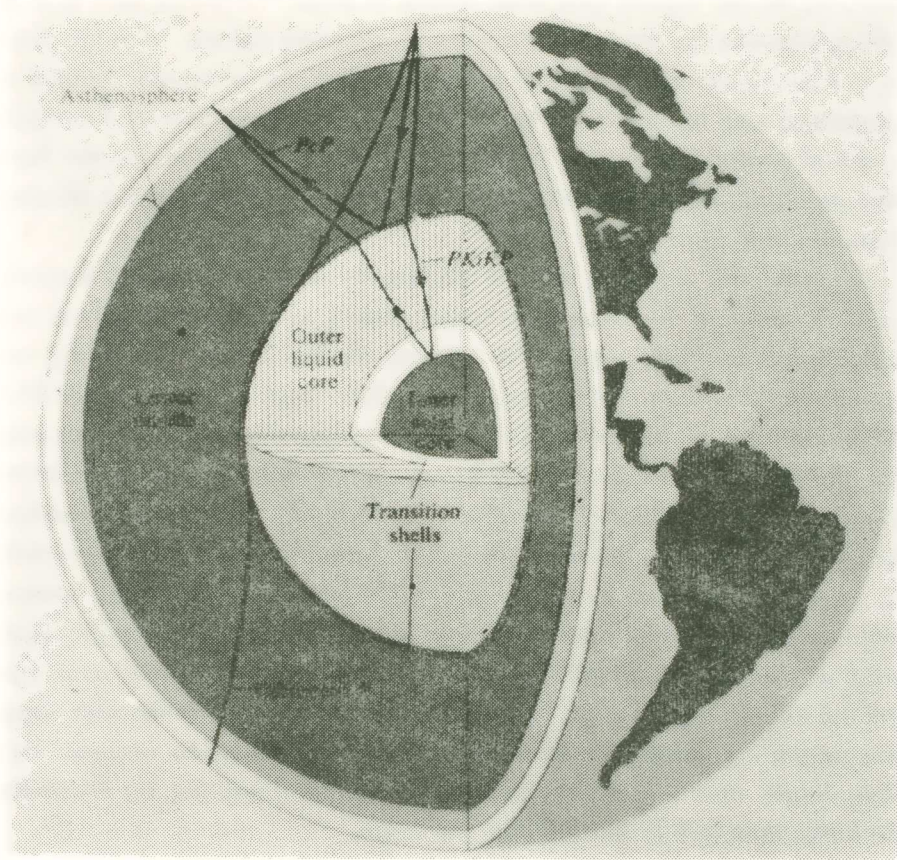




Εἰκ. 9. Harold Jeffreys (1891-1989).

Ἀπὸ τὸ 1807 ὁ μεγάλος φυσικὸς Jean Baptiste Fourier ἔχει δείξει ὅτι κάθε πολὺπλοκή κυματικὴ μορφή μπορεῖ νὰ θεωρηθεῖ ὡς ἐπιπρόσθεση ὀρισμένου ἀριθμοῦ ἀπλῶν ἀρμονικῶν κυμάτων μὲ ἰδιαίτερη συχνότητα ἕκαστο, ἰδιαίτερο μῆκος κύματος καὶ ἰδιαίτερη φάση. Τὸ σεισμικὸ φάσμα ποὺ ἐπιτυγχάνουμε ἀπὸ τὴν ἀνάλυση ἑνὸς σειсмоγράμματος κατὰ Fourier σχηματίζει συνεχῆ ταινία κυματικῆς ἐνέργειας ποὺ ἐκτείνεται σ' εὐρεία περιοχὴ συχνοτήτων. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι ὑπάρχει ποσὸ ἐνέργειας σ' ὅλες τὶς συχνότητες.

Γιὰ τὸν καθορισμὸ τῶν κυριότερων ἐπιφανειῶν ἀσυνεχείας κατὰ τοὺς πρώτους



Είχ. 10. Έγκάρσια τομή τῆς Γῆς ὅπως προκύπτει ἀπὸ πρόσφατες σεισμικὲς τομογραφίες μὲ πυρηνικὰ κύματα ἀπὸ ἀτομικὲς ἐκρήξεις. Κάτω ἀπὸ τὸν ἐξωτερικὸ λίθινο φλοιὸ ὑπάρχει ἡ λιθόσφαιρα καὶ ἡ ἀσθενόσφαιρα ποὺ ἀποτελοῦν τὸν ἀνώτερο μανδύα. Ὁ ἀνώτερος μανδύας χωρίζεται ἀπὸ τὸν κατώτερο μανδύα μὲ τεκτονικὴ ἀσυνέχεια. Κάτω ἀπὸ τὸν κατώτερο μανδύα ἐξωτερικὸς ὑγρὸς πυρήνας περιβάλλει μικρὸ στερεὸ πυρήνα ποὺ φθάνει μέχρι τὸ κέντρο τῆς Γῆς. Μεταξὺ τοῦ ἐξωτερικοῦ καὶ ἐσωτερικοῦ πυρήνα ὑπάρχει μεταβατικὸ στρώμα. Τὰ κύματα ποὺ ἀναγλῶνται στὸν ὑγρὸ καὶ στερεὸ πυρήνα χαρακτηρίζονται ὡς PcP καὶ PKiKP, ἀντιστοίχως. Τὰ κύματα ποὺ ὑφίστανται παράθλαση καὶ ἔρπονν στὴν ἐπιφάνεια τοῦ ὑγροῦ πυρήνα παρίστανται μὲ P. (Bruce A. Bolt, 1982).

χρόνους ἐξερεύνησης τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς χρησιμοποιήθηκε ὁ χρόνος ἄφιξης ἢ ὁ χρόνος διαδρομῆς τῶν πρώτων καὶ δευτέρων κυμάτων. Ἀπὸ τὴν περαιτέρω ἔρευνα δείχθηκε ὅτι οἱ συχνότητες τῶν κυμάτων ἔχουν σὲ ὁρισμένες περιπτώσεις μεγαλύτερη διακριτικὴ ἰκανότητα ἀπὸ τοὺς χρόνους διαδρομῆς των. Μὲ εἰδικὰ φίλτρα μποροῦμε σήμερα νὰ ἀπομονώσουμε ἢ νὰ ἐπιλέξουμε ἀπὸ φάσμα κυματικῶν συχνοτήτων ὁρισμένη περιοχὴ του ποὺ εἶναι ἀπαλλαγμένη ἀπὸ ἐνοχλητικὲς ἢ ἄνευ ἐνδιαφέροντος

συχρότητες. Μὲ τὴν τεχνικὴ αὐτὴ εἶναι δυνατὸ νὰ δοῦμε τὰ ἐνδότερα τῆς Γῆς μὲ μεγαλύτερη εὐκρίνεια ἀπὸ 8, τι φαίνονται μὲ τοὺς κυματικούς χρόνους. Ἡ διπλὴ ἐξερεύνηση τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς μὲ τὸ χρόνο ἐμφάνισης τῶν σεισμικῶν κυμάτων καὶ τῆ συχρότητά τους, δηλαδὴ τὸν ἀριθμὸ τῶν κυμάτων ποὺ διέρχονται σὲ 1 δευτερόλεπτο ἀπὸ τὸ σταθμὸ ἀναγραφῆς, ὑπῆρξε πολὺ ἀποτελεσματικὴ. Μὲ τὰ δύο βασικὰ αὐτὰ ἐργαλεῖα ἔρευνας ἀνακαλύφθηκαν, μεταξὺ ἄλλων, οἱ ἴδιες αἰωρήσεις ὁλόκληρου τοῦ σώματος τῆς Γῆς.

Στὶς ἀρχὲς τῆς δεκαετίας τοῦ '60 δειχθῆκε ὅτι κατὰ τοὺς μεγάλους σεισμοὺς ἡ Γῆ ἠχεῖ ὡς κώδωνας ποὺ παράγει ἀπόκοσμη μουσικὴ μὲ πλῆθος ταλαντώσεων σφαιροειδοῦς καὶ σπειροειδοῦς μορφῆς. Ἡ περίοδος τῆς θεμελιώδους ταλάντωσης σφαιροειδοῦς μορφῆς κατὰ τὸ μεγάλο σεισμὸ τῆς Χιλῆς —μεγέθους 8,6— στὶς 22 Μαΐου 1960 βρέθηκε ἴση μὲ 54 λεπτά. Οἱ ὑψηλότερες ἀρμονικὲς ταλαντώσεις ἔχουν μικρότερες περιόδους. Στὴ θεμελιώδη ταλάντωση σπειροειδοῦς μορφῆς, κατ' ἐπιτυχῆ παρομοίωση τοῦ σεισμολόγου Frank Press, προέδρου τῆς Ἀκαδημίας Ἐπιστημῶν στὴν Ἀμερικὴ, τὸ βόρειο καὶ νότιο ἡμισφαίριο συστρέφονται κατ' ἀντίθετες διευθύνσεις, κατὰ τὸν τρόπο ποὺ λικνίζονται στὸ δρόμο ὀρισμένες λεπτόσωμες γυναῖκες, τύπου Twigy. Στὴ θεμελιώδη ταλάντωση σφαιροειδοῦς μορφῆς ἡ γήινη σφαῖρα μοιάζει μὲ ἐλαστικὴ σφαῖρα ποδοσφαίρου μὲ ἀλλεπάλληλες διογκώσεις στὴν πάνω, κάτω καὶ πλάγια ἐπιφάνειά της. Ἡ περίοδος τῆς θεμελιώδους ταλάντωσης σφαιροειδοῦς μορφῆς εἶχε προβλεφθεῖ θεωρητικὰ ἀπὸ τὸν Love 70 χρόνια νωρίτερα ἴση μὲ 1 ὥρα, δηλαδὴ κατὰ 6 λεπτά μεγαλύτερη. Θεωρητικὰ ἡ περίοδος τῆς θεμελιώδους ταλάντωσης σπειροειδοῦς μορφῆς εἶναι 44 λεπτά.

Κατὰ τὶς θεωρητικὲς προβλέψεις τοῦ Bolt, ἡ Σελίγη ἔχει ἰδίᾳ περίοδο ταλάντωσης 15 λεπτά. Ἀπὸ τὶς ἀναγραφὰς τῶν σεισμογράφων, τῶν πρώτων ὀργάνων ποὺ ἐγκαταστάθηκαν ἀπὸ τὰ πληρώματα τῶν σεληνοπλοίων «Ἀπόλλων», ἀποδείχθηκε τὸ 1972 ὅτι καὶ ἡ Σελίγη ἔχει δυὸ ἀσυνέχειες στὰ βάθη τῶν 15 καὶ 25 χλμ.

Ἡ φασματοσκοπικὴ ἐξέταση τῆς Γῆς μὲ ὀρισμένη περιοχὴ σεισμικῶν συχνοτήτων ἀποτελεῖ σήμερα ἓνα ἀπὸ τὰ μεγαλύτερα ἐπιτεύγματα τοῦ σεισμολογικοῦ αἵωνα ποὺ ἄρχισε μὲ τὴν πρώτη ἀναγραφὴ μακρινοῦ σεισμοῦ στὶς 18 Ἀπριλίου 1889.

Σήμερα οἱ περισσότεροὶ σεισμολόγοι δὲν ἔχουν σὰν στόχο τὴν ἔρευνα τοῦ μηχανισμοῦ γένεσης καὶ ἔκλυσης τῶν σεισμῶν, ἀλλὰ τὴ λήψη μεγάλου ἀριθμοῦ σεισμικῶν τομογραφικῶν μὲ μεγαλύτερη διακριτικὴ ἰκανότητα ἀνάλυσης τῆς φυσιολογίας καὶ ἀνατομίας τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς. Στὸ προωθημένο σεισμολογικὸ μέτωπο, ὁ σεισμὸς, φυσικὸς ἢ τεχνητὸς ἀπὸ μικρὰς ἢ μεγάλες ἐκρήξεις, δὲν ἀποτελεῖ πλέον ἀντικείμενο ἔρευνας ἀλλὰ μέσον ἔρευνας τοῦ ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς καὶ τῆς Σελίγης, ποὺ εἶναι ἀπρόσιτο στὴν ἄμεση παρατήρηση. Ὑπάρχουν βέβαιες ἐλπίδες, ὅτι μὲ τὴ χρῆση με-

γαλύτερον ἀριθμοῦ ψηφιακῶν ἀναγραφῶν τῶν σεισμικῶν κυμάτων καὶ ἀνάλυση αὐτῶν μὲ ἠλεκτρονικὸς ὑπολογιστὲς μεγάλης δυναμικότητος θὰ ἐπιτευχθοῦν μέσα στὶς πρώτες δεκαετίες τοῦ δεύτερου σεισμολογικοῦ αἰῶνα, πὸν ἀρχίζει μὲ τὴν 18 Ἀπριλίου 1989, ἐντυπωσιακὲς ἀποκαλύψεις πολλῶν ἀγνώστων φυσικῶν καταστάσεων καὶ διεργασιῶν στὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς, καὶ λύση, ἐνδεχομένως, τοῦ ἀπατηλοῦ ὄνειρου ἐπιτυχοῦς πρόβλεψης τῶν σεισμῶν. Γι' αὐτὸ θὰ πρέπει νὰ τονισθεῖ ἀπὸ τοῦδε, ὅτι ὅποιαδήποτε πρόβλεψη σεισμῶν, ὅσοδήποτε ἐπιτυχῆς καὶ ἂν εἶναι, θὰ εἶναι ὅποιαδήποτε ὀλιγότερο ἐπωφελὴς ἀπὸ τὴν κατασκευὴ ἀντισεισμικῶν οἰκοδομῶν, ἢ ἀκόμη καὶ κανονικῶν καλοκτισμένων οἰκιῶν, μονωρόφων ἢ διωρόφων μὲ τὰ καθιερωμένα ἀπὸ τὸ 1928 - τὴν καταστροφὴ τῆς Κορίνθου - ὀπλισμένα διαζώματα ἀλλὰ σὲ στερεὸ συμπαγὲς ἔδαφος.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bolt, A. B., Inside the Earth, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1982.*  
*Bolt, A. B., Earthquakes, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1988.*  
*Γαλανοπούλου, Γ. Α., Στοιχεῖα Σεισμολογίας καὶ Φυσικῆς τοῦ Ἐσωτερικοῦ τῆς Γῆς, Ἀθῆναι 1971.*  
*Gerre, M. J. and H. C. Shah, Terra Non Firma, W. H. Freeman and Company New York, 1984.*  
*Richter, F. C h., Elementary Seismology, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1958.*