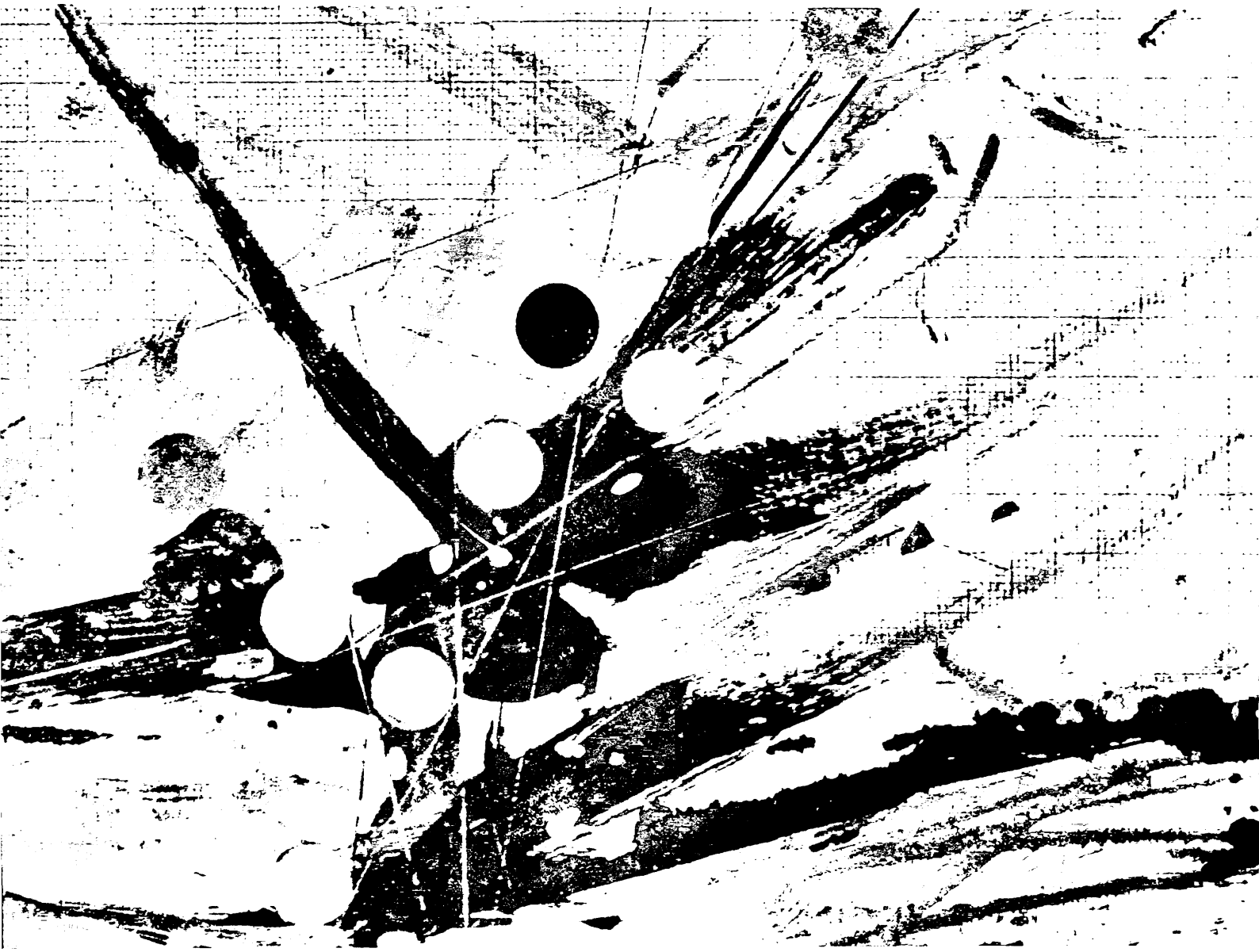
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Ηλίας Σ. Τριανταφυλλόπουλος



ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΗΛΙΑΣ Σ. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται σε όσους θέλουν να γνωρίσουν τις φυσικές διεργασίες που συντελούναι στον πλανήτη μας, ο οποίος είναι ο μοναδικός κατοικίσιμος πλανήτης του Ηλιακού μας συστήματος. Μιά τέτοια προσπάθεια έχει, αναπόφευκτα, πολλές δυσκολίες, μιάς και προϋποθέτει γνώσεις αρκετών, διαφορετικών μεταξύ τους, επιστημών. Πιστεύουμε ότι καταφέραμε να ξεπεράσουμε τις δυσκολίες αυτές, αποφεύγοντας λεπτομέρειες που μόνον τους ειδικούς ενδιαφέρουν και μαθηματικοποιημένες ποσοτικές περιγραφές, δίνοντας, αντίθετα, όσο το δυνατόν περισσότερα ποιοτικά στοιχεία και μόνον τις βασικές πληροφορίες που χρειάζονται για μια πρώτη κατανόηση των όσων συμβαίνουν στη Γη μας. Ετσι, τελικά το βιβλίο είναι προσιτό σε κάθε έναν που έχει μιά καλή γνώση της Φυσικής του Λυκείου, μιάς και πολλοί απ' αυτούς προς τους οποίους απευθύνεται έχουν αυτό ακριβώς το προσόν και τίποτα παραπέρα.

Ο αναγνώστης που θα βρει μερικά κεφάλαια ενδιαφέροντα, μπορεί να ανατρέξει σε άλλη, πιό ειδική και πιό πλούσια από άποψη ύλης βιβλιογραφία, και να πλουτίσει όσο περισσότερο θέλει τις γνώσεις του. Το βιβλίο αυτό αποτελεί λοιπόν το πρώτο βήμα, την πρώτη επαφή με το ουράνιο σώμα που μας φιλοξενεί. Αυτός άλλωστε ήταν και ο αντικειμενικός μας σκοπός όταν το γράφαμε. Για μιά δεύτερη και πιό ουσιαστική γνωριμία, θα πρέπει να αναζητηθούν άλλες πιό ειδικές πηγές.

Γιάννενα, 1998

ΙΔΟΥΛΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Βιβλιογραφία

1. W.L. Donn, "The Earth", John Willey & Sons, Inc, 1971
2. D.L. Anderson, "Theory of the Earth", Blackwell Scientific Publications, 1988
3. J.A.Jacobs, "Deep Interior of the Earth", Chapman & Hall, 1992
4. Time Life Books, "The Third Planet", Amsterdam 1988
5. B.A.Bolt, "Earthquakes", W.H. Freeman and Co, N.Y.1988, μετάφραση στα Ελληνικά από τις εκδόσεις "Τροχαλία".
6. R.T. Merrill and M.W. Mc Elhinny, "The Earth's Magnetic Field", Academic Press 1983.
7. J. Imbrie and K. Palmer Imbrie, "Ice Ages", Enslow Publishers 1978.
8. Β. Παπαζάχου, "Πρόγνωση των σεισμών: Ενα πάντα επίκαιρο θέμα", από το βιβλίο "Η Φυσική Σήμερα ΙΙ, Οι δέκα κλίμακες της ύλης", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, σελ. 247-280, 1991
9. Α.Γ. Γαλανόπουλου, "Στοιχεία Σεισμολογίας και Φυσικής του Εσωτερικού της Γης", Αθήνα 1971.

Bibliography

1. W.L. Dunn, "The Earth", John Wiley & Sons, Inc, 1971
2. G.E. Anderson, "Theory of the Earth", Blackwell Scientific Publications, 1989
3. J.A.Jacobs, "Deep Interior of the Earth", Chapman & Hall, 1992
4. Time Life Books, "The Third Planet", Amsterdam 1988
5. H.A.Bell, "Earthquakes", W.H. Freeman and Co, N.Y.1994
6. R.T. Merrill and M.W. Mc Elhiny, "The Earth's Magnetic Field", Academic Press 1983.
7. J. Lorbie and K. Panter Indice, "Ice Ages", Fabbri Publishers 1978.
8. B. Hyndcoxon, "Il Vulcano sotto casa", Eno Torino, Gruppo Editoriale Fabbri, 1989
9. "Il grande Zaurus II. Oi Giorni scomparsi", Fabbri Editore, 1971
10. A.T. Fiaccomonaco, "Storia Geologica", Ed. Dante Alighieri, Bari 1971

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ο ΤΡΙΤΟΣ ΠΛΑΝΗΤΗΣ

1.1 Ενας βράχος σε μιά γωνιά του σύμπαντος

Η Γη μας είναι ο τρίτος πλανήτης από τον Ηλιο, μετά τον Ερμή και την Αφροδίτη. Η μέση απόστασή της από τον Ηλιο είναι $1.496*10^8$ km (η μεγαλύτερη απόσταση απ' αυτόν στην ελλειπτική της τροχιά είναι $1.525*10^8$ km (απήλιο) και η μικρότερη $1.475*10^8$ km (περιήλιο)). Έχει σχήμα κατά προσέγγιση σφαιρικό (στην πραγματικότητα είναι ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής) με μέση ακτίνα R=6.371 km. Το συγκεκριμένο σχήμα έχει σαν αποτέλεσμα η διάμετρος του Ισημερινού να έχει μήκος 12.755 km, ενώ η απόσταση των δυο πόλων είναι ίση με 12.713 km. Υπάρχει, δηλαδή, μια διαφορά 42 km Αν υποθέσουμε ότι μπορούσαμε να ανοίξουμε μια τρύπα μέχρι το κέντρο της Γης, στην οποία θα ανεβοκατεβαίναμε με ένα ασανσέρ που κινείται με σταθερή ταχύτητα 100 km/h, με μια ταχύτητα αυτοκινήτου δηλαδή, τότε θα φτάναμε στο κέντρο του πλανήτη μας σε 2.65 μέρες (63.7 ώρες).

Από αστρονομικά δεδομένα γνωρίζουμε ότι η μάζα της Γης είναι ίση με m = $5.98*10^{24}$ kgr. Άρα η μέση πυκνότητά της είναι $\bar{\rho}$ = 5.517 gr/cm^3. Αυτή είναι μια μάλλον μεγάλη τιμή, και σίγουρα είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα κάθε άλλου πλανήτη του ηλιακού μας συστήματος εκτός από τον Ερμή, ο οποίος έχει σχεδόν την ίδια με αυτήν πυκνότητα 5.5 gr/cm^3. Τη μικρότερη πυκνότητα έχουν ο

Bibliography

1. W.L. Donn, "The Earth", John Wiley & Sons, Inc. 1971
2. D.L. Anderson, "Theory of the Earth", Blackwell Scientific Publications, 1989
3. J.A. Jacobs, "Deep Interior of the Earth", Chapman & Hall, 1992
4. Time Life Books, "The Third Planet", Amsterdam 1988
5. B.A. Bolt, "Earthquakes", W.H. Freeman and Co. N.Y. 1988, reprinted on Elsevier and the book "Tectonics"
6. A.T. Merrill and M.W. Mc Elhinny, "The Earth's Magnetic Field", Academic Press 1983
7. J.L. Lubin and K. Palmer Lubin, "Ice Ages", Fenskw Publishers 1978
8. B. Hamilton, "Hydrogen now becomes the energy carrier", and to Public "Energy II, O. Ken Nunnely and Ann", Development Bankers Association, 1981
9. A.T. Fabiantonio, "Energy Independence and Public Institutions", The Alvin 1981

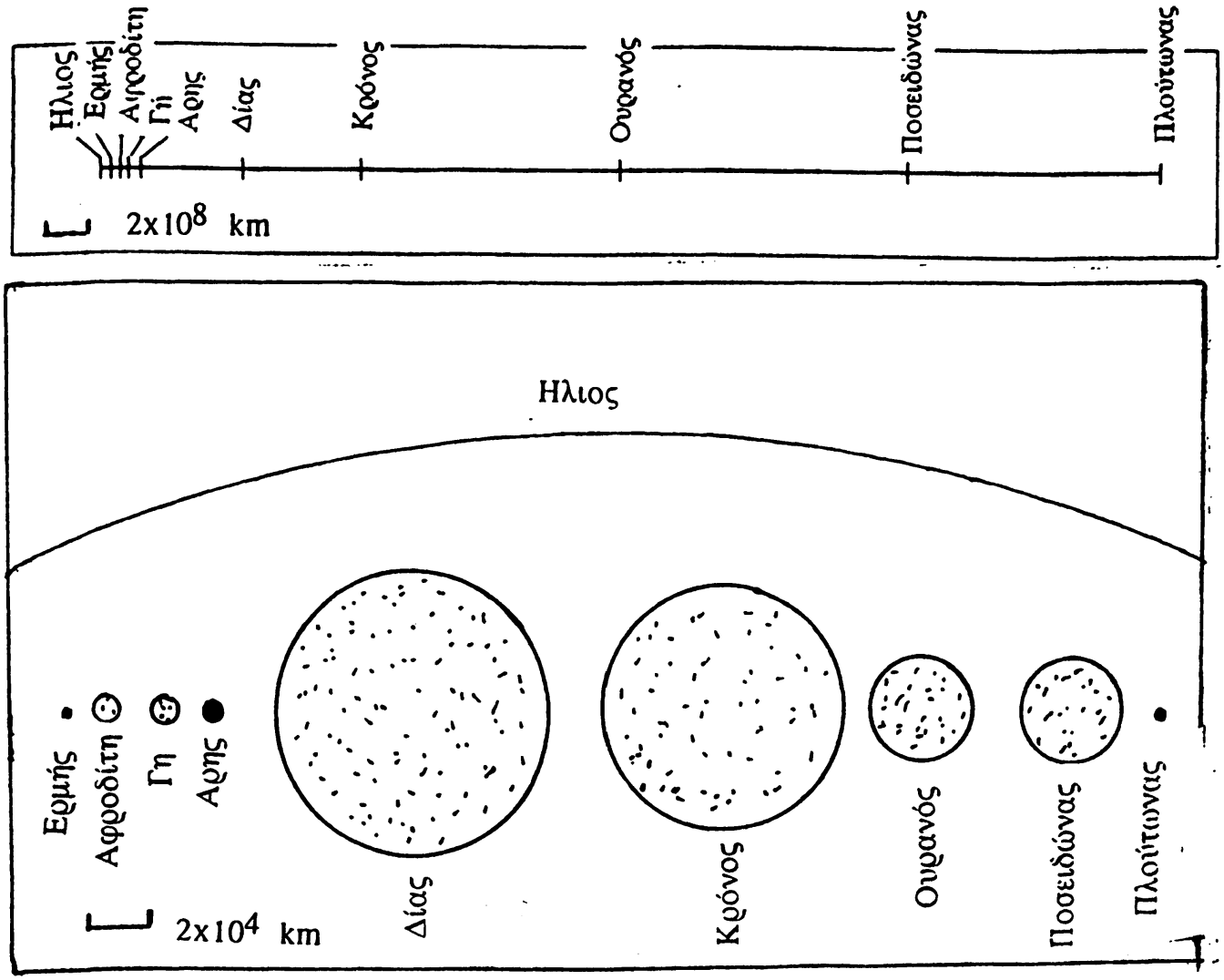
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ο ΤΡΙΤΟΣ ΠΛΑΝΗΤΗΣ

1.1 Ενας βράχος σε μιά γωνιά του σύμπαντος

Η Γη μας είναι ο τρίτος πλανήτης από τον Ηλιο, μετά τον Ερμή και την Αφροδίτη. Η μέση απόστασή της από τον Ηλιο είναι $1.496*10^8$ km (η μεγαλύτερη απόσταση απ' αυτόν στην ελλειπτική της τροχιά είναι $1.525*10^8$ km (απήλιο) και η μικρότερη $1.475*10^8$ km (περιήλιο)). Έχει σχήμα κατά προσέγγιση σφαιρικό (στην πραγματικότητα είναι ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής) με μέση ακτίνα R=6.371 km. Το συγκεκριμένο σχήμα έχει σαν αποτέλεσμα η διάμετρος του Ισημερινού να έχει μήκος 12.755 km, ενώ η απόσταση των δυο πόλων είναι ίση με 12.713 km. Υπάρχει, δηλαδή, μια διαφορά 42 km Αν υποθέσουμε ότι μπορούσαμε να ανοίξουμε μια τρύπα μέχρι το κέντρο της Γης, στην οποία θα ανεβοκατεβαίναμε με ένα ασανσέρ που κινείται με σταθερή ταχύτητα 100 km/h, με μια ταχύτητα αυτοκινήτου δηλαδή, τότε θα φτάναμε στο κέντρο του πλανήτη μας σε 2.65 μέρες (63.7 ώρες).

Από αστρονομικά δεδομένα γνωρίζουμε ότι η μάζα της Γης είναι ίση με m = $5.98*10^{24}$ kgr. Άρα η μέση πυκνότητά της είναι $\bar{\rho} = 5.517$ gr/cm^3. Αυτή είναι μια μάλλον μεγάλη τιμή, και σίγουρα είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα κάθε άλλου πλανήτη του ηλιακού μας συστήματος εκτός από τον Ερμή, ο οποίος έχει σχεδόν την ίδια με αυτήν πυκνότητα 5.5 gr/cm^3. Τη μικρότερη πυκνότητα έχουν ο



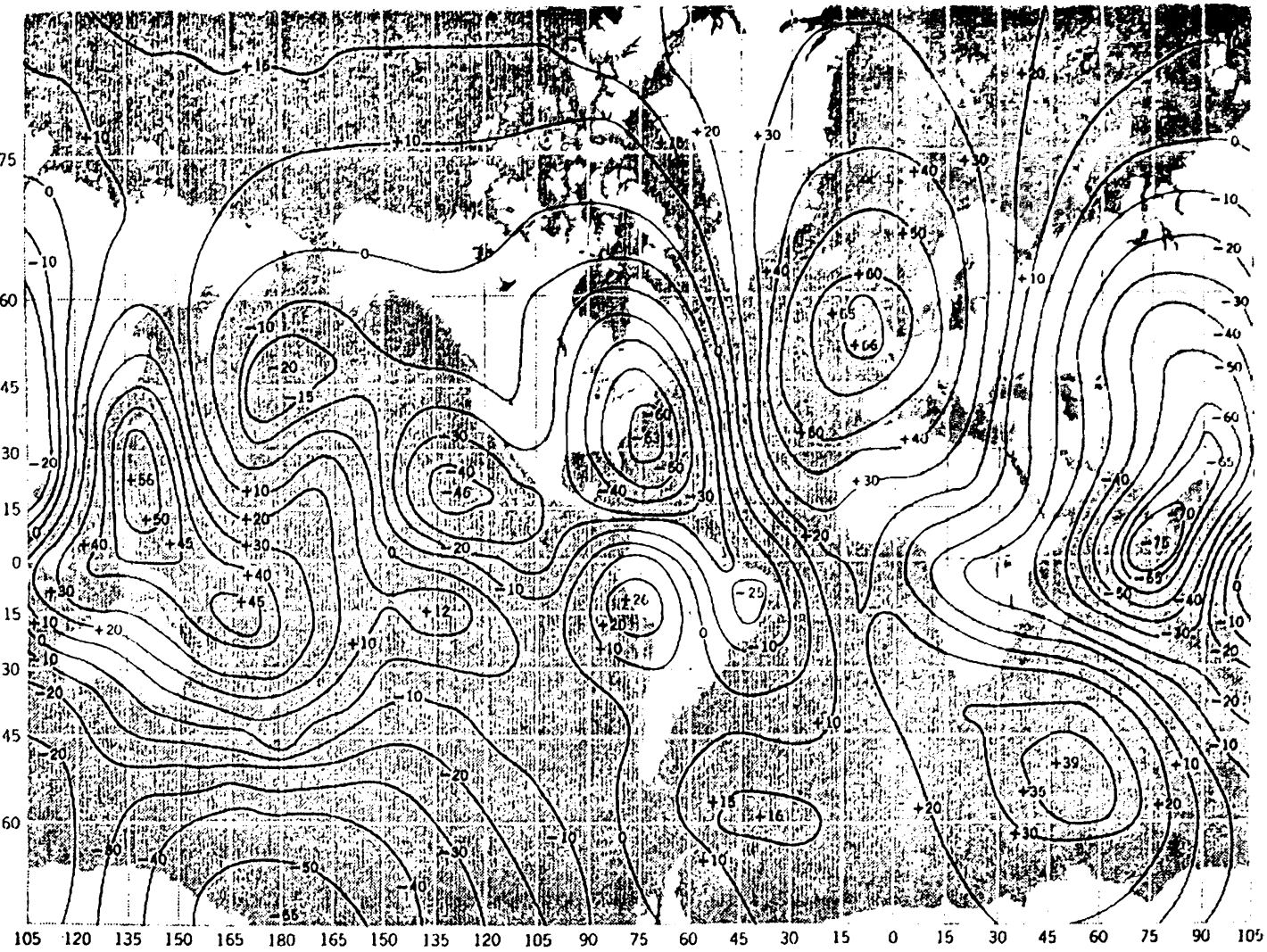
Οι αποστάσεις των πλανητών από τον Ηλιο και (σε διαφορετική κλίμακα) οι διαστάσεις τους. Δείχνεται επίσης ένα μικρό τμήμα του Ηλιου, μιάς και ολόκληρος θα ήταν αδύνατον να χωρέσει στο σχήμα χωρίς να μηδενιστούν σχεδόν οι διαστάσεις των πλανητών.

Σχήμα 1

Πλούτωνας (0.8 gr/cm^3) και ο Κρόνος (0.7 gr/cm^3). Ο Ήλιος έχει μια μέση πυκνότητα 1.41 gr/cm^3. Η Γη κινείται γύρω από τον Ήλιο με μια μέση ταχύτητα 29.8 km/sec. Για να κάνει μια πλήρη περιφορά γύρω από τον Ήλιο χρειάζεται 365.25 ημέρες, ενώ για να κάνει μια πλήρη περιφορά γύρω από τον άξονά της απαιτούνται 24h 3min 57sec.

Η γήινη επιφάνεια παρουσιάζει πολλές ενωμαλίες. Στα χαμηλότερα σημεία της υπάρχει η θάλασσα, η οποία και καταλαμβάνει τα 3/4 αυτής, ενώ η στεριά είναι μόνο το 1/4. Άρα η επιφάνεια του πλανήτη μας θαλασσοκρατείται. Έτσι, μιας και η λέξη Γη σημαίνει στεριά, η ονομασία της είναι μάλλον λαθεμένη, και θα έπρεπε να ήταν Ωκεανός. Αυτό θα απέδιδε καλύτερα την πραγματικότητα. Οι αρχαίοι όμως Έλληνες που της έδωσαν αυτή την ονομασία ίσως δεν μπορούσαν να φανταστούν εκείνη την εποχή το μέγεθος της θάλασσας. Ολη η ποσότητα του νερού στον πλανήτη μας ανέρχεται σε $1.3*10^{18}$ τόνους. Από αυτήν την ποσότητα το 99.7% βρίσκεται στη θ'αλασσα, το 0.27% στους πολικούς πάγους και το 0.03% στους ποταμούς, στις λίμνες και στις εσωτερικές θάλασσες. Επίσης υπάρχουν και $1.3*10^{13}$ τόνοι νερού υπό μορφή υδρατμών. Αυτό αντιστοιχεί στο 0.001% της συνολικής ποσότητας του νερού του πλανήτη μας.

Αν κοιτάξει κανένας τον πλανήτη μας από ένα διαστημόπλοιο τον βλέπει σαν μια μεγάλη ομαλή μπάλα μπιλιάρδου, να περιστρέφεται αργά γύρω από τον άξονά του. Οι αστροναύτες του διαστημόπλοιου "Απόλλων", όταν τους ζητήθηκε να περιγράψουν τη Γη όπως την έβλεπαν από ψηλά, είπαν ότι αυτός ο πλανήτης με το γαλάζιο νερό του και τα άσπρα του σύννεφα ήταν το μοναδικό ουράνιο σώμα που έβλεπαν στον ουρανό να τους προσκαλεί να το επισκεφτούν, η μοναδική φιλόξενη γωνιά στην παγωνιά του σύμπαντος



Δείχνεται η απόκλιση του σχήματος του πλανήτη μας από το ελλειψοειδές εκ περιστροφής ώστε να μας δώσει το γεωειδές. Οι αριθμοί σε κάθε καμπύλη δείχνουν τις θετικές ή αρνητικές αποκλίσεις σε μέτρα.

Σχήμα 2

Συνολικά οι ήπειροι και οι ωκεανοί, δηλαδή ολόκληρη η επιφάνεια της Γης, έχει εμβαδόν 500 εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα. Το πιο χαμηλό σημείο του στερεού φλοιού της Γης είναι 10.990 m στον Ειρηνικό ωκεανό, ενώ το πιο ψηλό σημείο 8.800 m είναι η κορυφή Έβερεστ του ορεινού όγκου των Ιμαλαΐων, στην Ινδία. Το ύψος αυτό αντιστοιχεί στο 0.2% της μέσης γήινης ακτίνας, ενώ το μεγαλύτερο βάθος αντιστοιχεί στο 0.25% της μέσης γήινης ακτίνας. Τα βουνά μας πάντως δεν είναι και τόσο ψηλά, αν λάβει κανένας υπόψη του ότι η πολύ μικρότερη Σελήνη έχει βουνά που φτάνουν σε ύψος 6.500 m. Αυτό οφείλεται στο ότι τα νερά της βροχής και τα χιόνια που λειώνουν και ξανασχηματίζονται (τα οποία λείπουν και τα δύο από τη Σελήνη) διαβρώνουν το έδαφος και το κάνουν όσο πιο ομαλό μπορούν. Σε περίπου 100 εκατομμύρια χρόνια η διάβρωση είναι σε θέση να ισοπεδώσει, μέχρι το επίπεδο των θαλασσινών νερών, όλα τα βουνά του πλανήτης μας. Αν σας φαίνεται παράξενο πώς ένα βουνό σαν τα Ιμαλάια μπορεί να γίνει έστω και στο παραπάνω διάστημα πεδιάδα, αναλογιστείται ότι για το σκοπό αυτό αρκεί να χάνει κάθε χρόνο μόλις 0.088 χιλιοστά του μέτρου, μερικούς κόκκους σκόνης δηλαδή. Αντίθετα όπου υπαρχουν μόνιμοι παγετώνες, όπως στους πόλους, η διάβρωση αποφεύγεται μιάς και δεν δημιουργείται ροή νερού. Τα βουνά της Ανταρκτικής, για παράδειγμα, με ύψος 4500 m και μήκος 3000m (Transantarctic) παραμένουν σχεδόν αναλλοίωτα για τα τελεταία 40 εκατομμύρια χρόνια.

1.2 Διαρκώς κατοικίσιμη ζώνη

Οι συνθήκες που επικρατούν πάνω στον πλανήτη μας για την ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής (στη μορφή τουλάχιστον που μπορούμε να την φανταστούμε) είναι ιδανικές, όσο κι' αν εμείς προσπαθούμε με κάθε τρόπο μέσα από την καταστροφή του περιβάλλοντος να τις αλλοιώσουμε. Η τεράστια και (για τα χρονικά δεδομένα που μας ενδιαφέρουν) αστείρευτη πηγή ενέργειας για να

επιτευχθεί αυτό είναι ο Ηλιος. Έχει υπολογιστεί ότι οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν σ' αυτόν (μέσα από το φαινόμενο της σύντηξης το υδρογόνο (H_2) μετατρέπεται σε Ηλιο (He), 4H He + ενέργεια) στέλνουν στη Γη περίπου $13.5*10^{19}$ kcal το χρόνο.

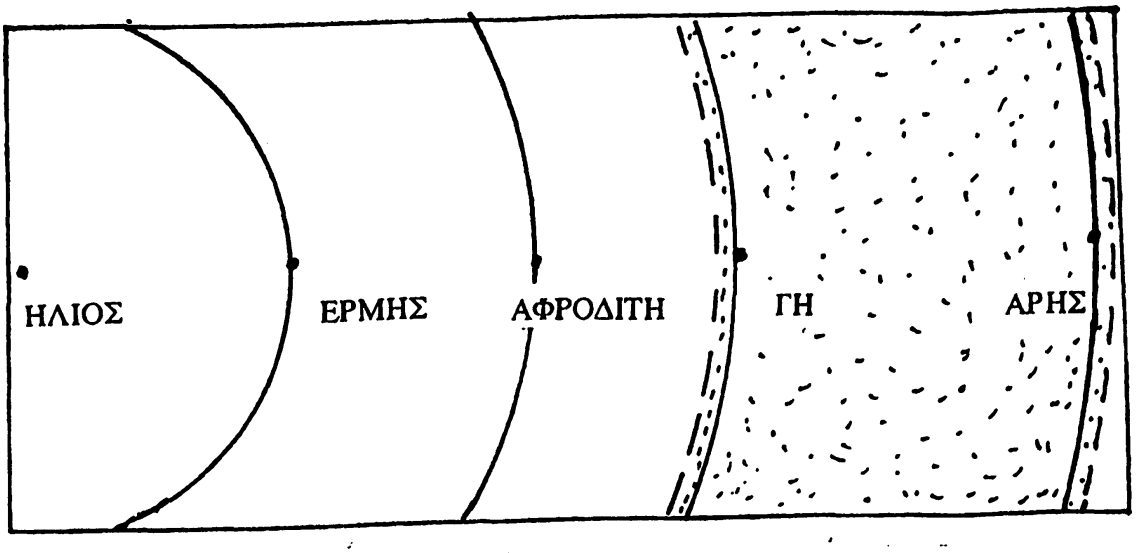
Από το ποσό αυτό το 29% ξαναανακλάται στο διάστημα και το 71% απορροφιέται ή δεσμεύεται με κάθε τρόπο από τη Γη. Οι πιο σημαντικοί ανακλαστήρες της ακτινοβολίας του Ηλιου που πέφτει στη Γη είναι τα σύννεφα, η ατμοσφαιρική σκόνη, τα μόρια των αερίων του ατμοσφαιρικού αέρα, το χιόνι και η χωρίς βλάστηση Γη. Ως πότε τα έχουμε αυτή την πολυτέλεια, της δωρεάν εκμετάλευσης της ηλιακής ενέγειας; Μην ανησυχείτε, για αρκετά χρόνια ακόμη. Ο Ηλιος θα ζήσει με τη σημερινή του μορφή άλλα 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια. Ως τότε είναι πιο πιθανόν άλλοι παράγοντες να έχουν επιδράσει καταστροφικά πάνω στον πλανήτη μας, και κυρίως εμείς, οι κάτοικοί του οι οποίοι αυξανόμαστε συνεχώς και μειώνουμε καθημερινά τις πηγές της ενέργειάς του. Έτσι ο πλανήτης μας σήμερα κατοικείται από 5 δισεκατομμύρια ανθρώπους περίπου. Από την αρχή του 18ου αιώνα ο πληθυσμός του έχει αυξηθεί κατά 8 φορές, και ο μέσος όρος ζωής έχει τουλάχιστον διπλασιαστεί.

Στο σημείο αυτό να ανοίξουμε μια παρένθεση και να πούμε ότι ο Ηλιος είναι πράγματι μια πηγή ζωής, όσο όμως η ενέργεια που μας στέλνει δεν είναι αφενός μεν πολύ μεγάλη, ώστε να ανεβάσει σημαντικά τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη μας, και αφετέρου υπάρχει κάποιος τρόπος να φιλτραριστούν οι επικίνδυνες για τη ζωή ακτινοβολίες που περιέχει το φάσμα του. Μέχρι στιγμής στη Γη ικανοποιούνται και οι δυο αυτοί όροι κα έτσι μπορούμε σήμερα εμείς οι κάτοικοί της να την εξετάζουμε και να ερευνούμε τα μυστικά της. Κανένας άλλος πλανήτης του ηλιακού μας συστήματος δεν έχει αυτή την πολυτέλεια. Τι ισχύει ακριβώς , λοιπόν, ώστε η Γη να είναι κατοικίσιμη, μια ιδιότητα που δεν την έχουν και οι δυο γειτονικοί της πλανήτες, ο Άρης και η Αφροδίτη; Αν θα μπορούσαμε να ρίχναμε μια ταυτόχρονη ματιά από μακριά σ' όλους τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, τότε θα απαντούσαμε αυθόρμητα. Μα, το νερό. Μόνο στη Γη

υπάρχει διαρκώς νερό στην επιφάνειά της σε υγρή μορφή. Άλλοι πλανήτες το έχουν είτε υπό μορφή πάγου είτε σαν υδρατμούς. Κατοικούμε, λοιπόν, στον πλανήτη της βροχής, των λιμνών, των ποταμών και των θαλασσών.

Και, πράγματι, αυτό είναι σωστό, μιας και μόνο η Γη έχει μια μέση επιφανειακή θερμοκρασία γύρω στους 15 ^{o}C, που επιτρέπει την ύπαρξη νερού σε υγρή μορφή. Αν πάμε για παράδειγμα στους δυο γειτονικούς της πλανήτες, τότε ο μεν Άρης έχει μια μέση επιφανειακή θερμοκρασία -60 ^{o}C, ενώ στην Αφροδίτη η αντίστοιχη τιμή είναι 460 ^{o}C. Είμαστε δε σε θέση να γνωρίζουμε ότι η Γη διέθετε υγρό επιφανειακό νερό στο μεγαλύτερο διάστημα της ιστορίας της, τουλάχιστον εδώ και 3.8 δισεκατομμύρια χρόνια. Ας μην ξεχνάμε δε πόσο ταλαιπωρείται μια χώρα σε περιόδους λειψυδρίας και ξηρασίας.

Στο σημείο αυτό να μείνουμε λίγο περισσότερο, μιας και το ερώτημα ποιος πλανήτης μπορεί να είναι διαρκώς κατοικίσιμος ή αν υπάρχουν και άλλοι κατοικίσιμοι πλανήτες στο γαλαξία μας ή σε άλλους γαλαξίες έχει εκτός των άλλων και φιλοσοφικές προεκτάσεις, και άρα αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Είναι προφανές ότι για να μπορέσει να αναπτυχθεί ζωή σε έναν πλανήτη του δικού μας ηλιακού συστήματος, ή σε άλλο παρόμοιο, ο πλανήτης αυτός θα πρέπει να μην είναι ούτε πολύ κοντά στον Ηλιο του αλλά ούτε και πολύ μακριά. Κι' αυτό κυρίως για να μπορεί το νερό που υπάρχει στον πλανήτη, και παίζει τόσο καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη και διατήρηση της ζωής, να διατηρείται στην υγρή μορφή. Έτσι, λοιπόν, υπάρχει μια περιοχή που καθορίζεται από μια ελάχιστη και μια μέγιστη απόσταση από τον Ηλιο, που μπορούμε να την ονομάσουμε "Διαρκώς κατοικίσιμη ζώνη". Η ονομασία αυτή έχει την έννοια ότι οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε να επιτρέπουν την ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής για μεγάλα χρονικά διαστήματα, της τάξης των δισεκατομμυρίων χρόνων, δεν είναι δηλαδή ευκαιριακές μικρές παρενθέσεις στην ιστορία του πλανήτη. Εάν η τροχιά ενός πλανήτη βρίσκεται μέσα στην περιοχή αυτή, τότε υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες ο πλανήτης να είναι κατοικίσιμος.



Σύμφωνα με τους υπολογισμούς πολλών ερευνητών η συνεχώς κατοικίσιμη ζώνη βρίσκεται σήμερα λίγο πιό μέσα από την τροχιά της Γης και λίγο παραπέρα από την τροχιά του Αρη.

Σχήμα 3

Για τη μικρότερη απόσταση από τον Ηλιο, έχει υπολογιστεί ότι θα πρέπει να είναι περίπου 0.95 AU (1AU = 1 Αστρονομική μονάδα = $150*10^6$ km = η μέση απόσταση Γης-Ηλιου). Σε αποστάσεις πιο μικρές από την παραπάνω η ροή της ηλιακής ενέργειας γίνεται σχετικά μεγάλη, και συγκεκριμένα υπερβαίνει κατά 1.1 φορές την ανίστοιχη μέση ροή ηλιακής ενέργειας στη Γη. Αυτό θα έχει σα συνέπεια

ο πλανήτης να δέχεται έντονη ακτινοβολία και να χάσει το νερό του λόγω φωτοδιάσπασης. (Να σημειώσουμε ότι η Αφροδίτη απέχει από τον Ηλιο 0.72 AU).

Για τη μεγαλύτερη απόσταση τα πράγματα είναι πιο δύσκολα. Αρχικά, κάποιοι πρώτοι υπολογισμοί οδηγούσαν στο συμπέρασμα ότι δεν μπορεί να υπερβαίνει την τιμή των 1.01 AU. Η τιμή αυτή είναι εντυπωσιακά λίγο πιο μεγάλη από τη μέση απόσταση Γης-Ηλιου, και επομένως καθορίζει μια πολύ στενή σχετικά ζώνη για την ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής. Άλλοι όμως υπολογισμοί ανεβάζουν σημαντικά την απόσταση που μας ενδιαφέρει, και συγκεκριμένα στις 1.52AU, λίγο παραπέρα δηλαδή από την τροχιά του Άρη. Ο Άρης απέχει από τον Ηλιο 1.513 AU. Εκείνο που έχει σημασία στον υπολογισμό της απόστασης αυτής, είναι να μη μειωθεί η ροή της ηλιακής ενέργειας τόσο ώστε η μέση θερμοκρασία του πλανήτη να είναι κάτω από τους 0 ^{o}C. Στην αντίθετη περίπτωση το νερό στον πλανήτη θα υπάρχει μόνο σαν πάγος.

Η μια κάποια αβεβαιότητα σε σχέση με τη μέγιστη απόσταση ασφάλειας, έχει να κάνει με το γεγονός ότι δεν είναι μόνο η μέση απόσταση του πλανήτη από τον Ηλιο ο μόνος παράγοντας που καθορίζει την επιφανειακή του θερμοκρασία, αλλά και η σύσταση της ατμόσφαιράς του. Έτσι, για παράδειγμα, αν ο πλανήτης έχει αυξημένα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρά του, τότε παρ' ότι δέχεται λίγη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία είναι σε θέση μέσα από το φαινόμενο του θερμοκηπίου (στο οποίο το διοξείδιο του άνθρακα παίζει καθοριστικό ρόλο) να διατηρεί τη θερμοκρασία του πάνω από το σημείο πήξης του νερού σε πάγο. Βέβαια, σε μια ατμόσφαιρα με αυξημένα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα ανθρώπινα όντα σαν εμάς δεν μπορούν να απαπνεύσουν, άλλες, όμως, μορφές ζωής δεν θα είχαν κανένα πρόβλημα.

Μερικοί υποστηρίζουν ότι οι τρεις γειτονικοί πλανήτες (Γη, Αφροδίτη και Άρης) ήταν στα πρώτα τους βήματα αρκετά όμοιοι. Είχαν ίδια συστατικά στην επιφάνειά τους και ίδια αέρια στην ατμόσφαιρά τους, συμπεριλαμβανομένου του διοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών. Ήταν επίσης αρκετά εύκρατοι για να διατηρήσουν το νερό σε υγρή μορφή στην περισσότερη έκταση της επιφάνειάς τους.

Κατέληξαν όμως τελικά να έχουν τελείως διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες κυρίως λόγω του ότι διέφεραν στην ικανότητά τους να ανακυκλώσουν το διοξείδιο του άνθρακα ανάμεσα στο στερεό φλοιό και την ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, στηριγμένοι σε διάφορες παρατηρήσεις μερικοί επιστήμονες πρότειναν ότι όσον αφορά στον κύκλο αυτό, η Γη έχει τη μοναδική ικανότητα μέσω ενός μηχανισμού ανακύκλωσης να αυξάνει το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα όταν η επιφάνειά της αποκτά θερμοκρασίες κάτω από το μέσο όρο και να μειώνει το ποσοστό αυτό όταν η επιφάνειά της αποκτά θερμοκρασίες πάνω από το μέσο όρο. Έτσι, δεδομένου του ρόλου που παίζει το διοξείδιο του άνθρακα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, το κλίμα της Γης παρέμεινε ενδιάμεσο, και επομένως κατάλληλο για την ανάπτυξη της ζωής. Από την άλλη μεριά, ο μεν Άρης πάγωσε γιατί έχασε την ικανότητα να ξαναεπιστρέψει διοξείδιο του άνθρακα από την επιφάνειά του στην ατμόσφαιρα, η δε Αφροδίτη, αντίθετα, δεν μπορεί να γυρίσει διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρά της στην επιφάνειά της. Έχει επομένως έντονο το φαινόμενο του θερμοκηπίου, και άρα και υψηλότατες θερμοκρασίες. Ο Άρης, παρ' ότι ίσως βρίσκεται μέσα στα όρια της διαρκώς κατοικίσιμης ζώνης, εντούτοις είναι ένας αρκετά μικρός πλανήτης (η μάζα του είναι ίση με 6.4×10^{23} kgr) ώστε ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα να δώσει στην ατμόσφαιρά του τα ποσά που απαιτούνται για να λειτουργεί αποτελεσματικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Να σημειωθεί τέλος ότι ο πρώτος πλανήτης, ο Ερμής, δεν έχει καθόλου ατμόσφαιρα, και επομένως εκεί η θερμοκρασία καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τον Ηλιο, ενώ όλοι οι υπόλοιποι πλανήτες βρίσκονται πολύ μακριά από τον Ηλιο, και επομένως είναι παγωμένοι.

Τα όρια της διαρκώς κατοικίσιμης ζώνης παίζουν μεγάλο ρόλο στο ερώτημα αν στο σύμπαν μας υπάρχουν άλλα, και πόσα, πλανητικά συστήματα με κατοικίσιμους πλανήτες. Όπως είναι προφανές, εάν τα παραπάνω όρια είναι στενά, τότε μειώνονται σημαντικά και οι πιθανότητες ύπαρξης τέτοιων πλανητών, και αντίστροφα. Επειδή, όμως, μπαίνει στη μέση η χημεία της ατμόσφαιρας, και κύρια ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα ο οποίος εξαρτιέται από πολλούς

παράγοντες, το θέμα παραμένει ακόμη ανοιχτό. Είναι επίσης προφανές ότι τα όρια της διαρκώς κατοικίσιμης ζώνης είναι συνάρτηση και του μεγέθους του Ηλιου του κάθε πλανητικού συστήματος, όπως και της ηλικίας του. Σε σχέση με το τελευταίο, που μας αφορά κύρια, να πούμε ότι ο Ηλιος μας βρίσκεται στο στάδιο στο οποίο η φωτεινότητά του αυξάνει κατά 1% περίπου κάθε 100 εκατομμύρια χρόνια. Αυτό σημαίνει, ότι αν η χημεία της ατμόσφαιρας της Γης δεν αλλάξει σημαντικά, σε 1 δισεκατομμύριο χρόνια η Γη θα βρίσκεται έξω από τα όρια της διαρκώς κατοικίσιμης ζώνης, και συγκεκριμένα η μέση απόστασή της από τον Ηλιο θα είναι μικρότερη από το ελάχιστο όριο ασφάλειας. Μιλάμε, όμως, για ένα πολύ μακρινό μέλλον. Προς το παρόν η Γη εξακολουθεί να είναι ο φιλόξενος τρίτος πλανήτης.

1.3 Η μοναδικότητα του πλανήτη μας

Πόσο καλά όμως ξέρουμε αυτόν τον τρίτο πλανήτη, το σπίτι μας που επί τόσα χρόνια μας ανέχεται στη ράχη του; Μάλλον λίγο, και κυρίως από σκόρπιες πληροφορίες που παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ασύνδετες μεταξύ τους μέχρι το τέλος. Νομίζουμε λοιπόν ότι είναι και χρήσιμο αλλά και ενδιαφέρον να αποτολμήσουμε μια βαθύτερη γνωριμία μαζί του, κάτι που θα το κάνουμε στα πλαίσια αυτού εδώ του βιβλίου. Πολλές φορές μάλιστα οι γεωεπιστήμονες λένε με κάποιο παράπονο, ότι ζηλεύουν τους αστρονόμους που ξέρουν με τόσες λεπτομέρειες τι συμβαίνει σ' ένα αστέρι που βρίσκεται εκατομμύρια έτη φωτός μακριά, ενώ αυτοί γνωρίζουν τόσο λίγα για το τι γίνεται μερικές χιλιάδες μέτρα κάτω από τα πόδια τους. Όμως υπάρχει μια σοβαρή δικαιολογία γιατί συμβαίνει αυτό.

Σε μια επιστήμη, δεν μπορείς να φανταστείς χειρότερο πράγμα από το να υπάρχει ένα και μοναδικό αντικείμενο στη μελέτη της. Από την εποχή που ο Γαλιλαίος έβαλε τα θεμέλια της συγχρονης επιστημονικής μεθόδου (σωστή

παρατήρηση, θεωρία, πειραματική επαλήθευση) οι επιστήμονες έχουν κατανοήσει ότι όσο πιο πολλά είναι τα αντικείμενα της μελέτης τους και όσο πιο πολλά πειράματα μπορούν να εκτελέσουν σε σχέση με τη συμπεριφορά τους, τόσο πιο καλά θεωρητικά μοντέλα μπορούσαν να φτιάξουν. Μέσα από τέτοιες σωστές παρατηρήσεις και εκτέλεση πολλών πειραμάτων, ο ίδιος ο Γαλιλαίος μας έδωσε τους νόμους της κίνησης, και αργότερα ο Νεύτωνας έχτισε την ομώνυμη μηχανική του. Και οι δυο τους είχαν τη δυνατότητα να παρατηρούν πολλά δυναμικά συστήματα και να τα αναπαράγουν με τα πειράματά τους. Βέβαια, γνωρίζουμε ότι τα πράγματα δεν είναι πάντα ρόδινα, και ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ενώ μπορεί να γίνει μια κάποια παρατήρηση, εντούτοις το πείραμα είναι αδύνατον. Η αστρονομία, για παράδειγμα, μέσα από συνεχείς παρατηρήσεις μπορεί να μας πεί κάποια πράγματα για το σχηματισμό των αστέρων, για την πορεία τους και το θάνατό τους. Όμως είναι πέρα για πέρα άπιαστο όνειρο η εκτέλεση κάποιων πειραμάτων πάνω σ' αυτά τα θέματα. Το επόμενο πιο δύσκολο σκαλοπάτι είναι και να μην έχεις τη δυνατότητα να εκτελέσεις κάποια πειράματα που να αναπαράγουν τα συστήματα που εξετάζεις, και παραπέρα τα συστήματα αυτά να είναι εντυπωσιακά λίγα, έως ένα μόνο. Σήμερα, δυο μόνον τέτοια συστήματα υπάρχουν για εξέταση. Ολόκληρο το σύμπαν, υπάρχει ένα και μοναδικό για παρατήρηση, και η Γη, είναι ο μοναδικός κατοικίσιμος πλανήτης που γνωρίζουμε. Να σημειώσουμε ότι αυτό δεν σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπάρχουν και άλλα σύμπαντα ή άλλοι κατοικίσιμοι πλανήτες. Απλά εμείς δεν μπορούμε μέχρι σήμερα να παρατηρήσουμε ούτε τα μεν ούτε τους δε.

Κάθε τι λοιπόν που γίνεται πάνω στον πλανήτη μας έχει για πολλούς λόγους μία ιδιαιτερότητα και μια μοναδικότητα. Αν μάλιστα δούμε τον πλανήτη μας ως ένα ενιαίο σύνολο του οποίου τα διάφορα δυναμικά συστήματα (και άρα και η βιόσφαιρα) βρίσκονται σε αμοιβαία αλληλεπίδραση, τότε καταλαβαίνει κανένας γιατί γίνεται η παραπάνω παρατήρηση. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι οι γεωεπιστήμονες έχουν ένα εντυπωσιακά δύσκολο έργο. Πόσο πιο καλά θα ήταν τα πράγματα αν θα μπορούσαν να παρατηρήσουν και άλλους κατοικίσιμους

πλανήτες κι' ακόμη καλύτερα αν θα μπορούσαν να ανταλλάξουν τις παρατηρήσεις τους με άλλα νοήμονα όντα που πιθανόν θα κατοικούσαν σ' αυτούς. Τίποτα από αυτά, όμως, δεν ισχύει και έτσι η Γη εξακολουθεί να είναι ο μοναδικός κατοικίσιμος πλανήτης που γνωρίζουμε και παρατηρούμε, και από τις παρατηρήσεις μας αυτές πρέπει να καταλήξουμε σε κάποια πολύ γενικά συμπεράσματα.

Η εξέταση του πλανήτη μας περιλαμβάνει την εξέταση μιας ποικιλίας φαινομένων, που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την κλίμακα του χώρου τους, του χρόνου τους, του ενεργειακού τους περιεχομένου κ.λ.π. Ένας σεισμός για παράδειγμα είναι το αποτέλεσμα της απότομης μετατόπισης δυο πλακών πολύ μεγάλης μάζας κατά μερικά εκατοστόμετρα, ενώ τα σεισμικά κύματα που παράγονται είναι σε θέση να διανύσουν πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα σε λίγο χρόνο μεταφέροντας εντυπωσιακά μεγάλα ποσά ενέργειας. Από την άλλη μεριά η διαμόρφωση μιας συνηθισμένης εδαφικής επιφάνειας (βουνά, ποταμοί κ.λ.π.) απαιτεί χιλιάδες ή και εκατομμύρια χρόνια, ενώ και η σημερινή χημική σύσταση της ατμόσφαιράς μας είναι αποτέλεσμα διεργασιών που κράτησαν εκατομμύρια χρόνια. Τέλος, μια καταιγίδα ξεσπά απότομα στην ατμόσφαιρα και διαρκεί λίγες ώρες, ενώ σύντομη είναι σχετικά και η έκρηξη ενός ηφαιστείου κατά την οποία έρχεται στην επιφάνεια της Γης μάγμα μέσα από τα έγκατα της Γης.

Πολλοί έχουν την τάση να βλέπουν τη Γη σαν μια τεράστια μηχανή, ή ακόμη και σαν ένα ζωντανό οργανισμό, όπου τα διάφορα μέρη (εσωτερικό της Γης, ατμόσφαιρα, επιφάνεια, βιόσφαιρα κ.λ.π.) εργάστηκαν αρμονικά επί χρόνια για να μας δώσουν τη σημερινή εικόνα, και εργάζονται και σήμερα για την εικόνα που θα παρουσιάσουν στο μέλλον. Άλλες φορές τα αποτελέσματα αυτής της ζωντάνιας της Γης είναι άμεσα προσιτά στις αισθήσεις μας, όπως τα μετεωρολογικά φαινόμενα και οι επιφανειακές παραμορφώσεις για παράδειγμα, και άλλες φορές είναι πέρα από κάθε αισθητή προσέγγιση, όπως τα ρεύματα μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό της Γης, η κυκλοφορία των υπόγειων νερών κ.λ.π.

1.4 Η ηλικία της Γης - Ανιχνεύοντας το παρελθόν της

Τα πρώτα ερωτήματα που θα μας απασχολήσουν είναι αυτά που αναφέρονται στην ηλικία της Γης και στον τρόπο με τον οποίο δημιουργήθηκε. Θα ξεκινήσουμε με το ερώτημα που αναφέρεται στην ηλικία της.

Παρά το ότι το διάστημα που έχει περάσει από τη στιγμή της δημιουργίας της Γης, αλλά και από άλλους σημαντικούς σταθμούς της ιστορίας της, είναι εντυπωσιακά μεγάλο, εντούτοις υπάρχουν αρκετά ίχνη της εξέλιξής της, από τα οποία μπορούμε να αντλήσουμε σημαντικές πληροφορίες. Όπως θα διαπιστώσει ο αναγνώστης, προς την κατεύθυνση της ανακάλυψης αυτών των ιχνών οι γεω-χημικοί, -φυσικοί, -βιολόγοι (αν και όχι μόνο αυτοί) έχουν κινηθεί με καταπληκτική φαντασία, και έχουν σαρώσει στην κυριολεξία ξηρά και θάλασσα. Στοιχεία που για άλλους δεν λένε τίποτα, είναι για αυτούς ένα ολόκληρο βιβλίο χρήσιμων και αναντικατάστατων πληροφοριών. Στρώματα πετρωμάτων, ιζήματα, λάβα από παλιά υφαίστεια, κελύφη πρωτόγονων οργανισμών, χιόνι από παλιές χιονοπτώσεις που ακόμη δεν έχει λυώσει κ.λ.π., όλα συνθέτουν τις σελίδες του βιβλίου που περιγράφει την ιστορία της Γης στη διάρκεια δισεκατομμυρίων χρόνων.

Σήμερα ξέρουμε ότι στη διάρκεια της εξέλιξής της η Γη πέρασε από πολλές και διαφορετικές μεταξύ τους φάσεις. Για να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τη χρονική διάρκεια κάθε φάσης, όπως και τη συνολική της ηλικία, είναι προφανές ότι μας χρειάζεται ένα ρολόϊ. Στα πιο παλιά χρόνια η μέθοδος που χρησιμοποιούσαν οι γεωλόγοι για να χρονολογήσουν τα φαινόμενα που τους ενδιέφεραν στηριζόταν σε ένα βιολογικό ρολόϊ τη διαδοχική εναπόθεση απολιθωμάτων σε στρώματα. Τα απολιθώματα αυτά ανήκουν σε οργανισμούς που η εμφάνιση και εξέλιξή τους σηματοδοτούν σημαντικά χρονικά γεωλογικά διαστήματα. Μέχρι και στα τέλη του περασμένου αιώνα αυτό ήταν το μοναδικό ρολόϊ, με τα αναμενόμενα σφάλματά του, που διέθεταν οι γεωλόγοι. Έως τη στιγμή που, με την είσοδο του 20 αιώνα, έκανε την εμφάνισή του ένα καινούριο

και σχετικά πιο ακριβές εργαλείο χρονομέτρησης. Το ρολόϊ της ραδιενεργούς διάσπασης κάποιων ισοτόπων. Η λειτουργία του ρολογιού αυτού στηρίζεται στο ότι οι πυρήνες μιας σειράς ασταθών στοιχείων που υπάρχουν στη φύση, και τα οποία ονομάζονται ραδιενεργά, μέσα από κάποιες φυσικές διεργασίες μεταπίπτουν με την πάροδο του χρόνου σε άλλους πιο σταθερούς πυρήνες. Για παράδειγμα το ^{87}Sr μεταπίπτει στο Rb^{87}, το K^{40} στο Ar^{40} κ.λ.π. Οι διεργασίες αυτές έχουν μελετηθεί πολύ καλά στην πυρηνική φυσική απ' όπου μαθαίνουμε ότι η μετάπτωση δεν συντελείται ταυτόχρονα για όλους τους πυρήνες, αλλά ακολουθεί ένα συγκεκριμένο στατιστικό νόμο.

Έστω για παράδειγμα ότι το ραδιενεργό στοιχείο Α μεταπίπτει στο σταθερό στοιχείο Β. Αν κάποια χρονική στιγμή t_0 ξεκινήσουμε με μια ποσότητα που περιέχει 100% το στοιχείο Α και συγκεκριμένα με N_0 πυρήνες από το στοιχείο αυτό, τότε μετά από πάροδο χρόνου Τ, δηλαδή τη χρονική στιγμή $t = t_0 + T$, το ποσοστό του στοιχείου Α στην παραπάνω ποσότητα θα έχει μειωθεί, και συγκεκριμένα θα έχουμε Ν πυρήνες απ' αυτό ($N < N_0$) όπου

$$N = N_0 e^{-\lambda T}$$

όπου λ είναι μια σταθερή ποσότητα. Το αντίστροφό της $\tau = 1/\lambda$ ονομάζεται μέσος χρόνος ζωής του στοιχείου Α, και είναι μια χαρακτηριστική ποσότητα του στοιχείου αυτού.

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς Τ παίρνουμε

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N} = \tau \ln \frac{N_0}{N}$$

Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε, λοιπόν, εξετάζοντας το ποσοστό του στοιχείου Α που υπάρχει σήμερα σ' ένα πέτρωμα (ή όπου αλλού), και υποθέτοντας ότι αρχικά στο πέτρωμα αυτό το παραπάνω στοιχείο υπήρχε σε ποσοστό 100%, να υπολογίσουμε με καλή σχετικά ακρίβεια το Τ, δηλαδή την ηλικία του.

Για παράδειγμα, το ουράνιο -238 (U^{238}) μεταβάλλεται μέσα από μια ραδιενεργό διάσπαση σε μόλυβδο -206 (Pb^{206}) με χρόνο ημιζωής 4.468 δισεκατομμύρια χρόνια. Θα έχουμε λοιπόν

$$U^{238}(t) = U^{238}(t=0)e^{-\lambda_U t}$$

όπου $$U^{238}(t=0) = U^{238}(t) + Pb^{206}(t)$$

Άρα

$$\frac{U^{238}(t)}{Pb^{206}(t)} = \frac{e^{-\lambda_U t}}{1- e^{-\lambda_U t}} = \varrho$$

Για $\lambda_U t << 1$ έχουμε $\varrho = \frac{1}{\lambda_U t}$. Έτσι αν βρούμε το λόγο των πυρήνων του U^{238} προς εκείνον του Pb^{206} ίσο με 10, θα έχουμε

$$t = 0.1 * 4.468 * 10^9 y \approx 4.5 * 10^8 y$$

Το ουράνιο -235 (U^{235}) διασπάται και αυτό, δίνοντας μόλυβδο -207 (Pb^{207}) με χρόνο ημιζωής 0.7038 δισεκατομμύρια χρόνια. Εάν λοιπόν υποθέσουμε ότι την εποχή που σχηματίστηκαν στο σύμπαν οι πυρήνες υπήρχαν ίσες ποσότητες U^{238} και U^{235}, τότε μετά από χρόνο t θα έχουμε

$$\varrho = \frac{U^{238}(t)}{U^{235}(t)} = \frac{e^{-\lambda_{238} t}}{e^{-\lambda_{235} t}}$$

Θέτοντας $\varrho = 140$ βρίσκουμε

$$e^{-(\lambda_{238} - \lambda_{235})t} = 140$$

ή

$$t = \frac{\ln 140}{\frac{1}{0.7038} - \frac{1}{4.468}} * 10^9 = 4.1*10^9 y.$$

Για να απαντήσουμε σε ερωτήματα που μας φέρνουν πολύ πίσω στη γεωλογική κλίμακα του χρόνου, είναι προφανές ότι χρειαζόμαστε ραδιενεργά στοιχεία με μεγάλο χρόνο ημιζωής. Ραδιενεργά στοιχεία τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο από την άποψη αυτή είναι το Κάλιο -40 (K^{40}), το Ρουβίδιο-87 (Rb^{87}), το Σαμάριο - 147 (Sm^{147}), το Θόριο -232 (Th^{232}), το Ουράνιο -235 (U^{235}) και το Ουράνιο -238 (U^{238}). Οι διασπάσεις των στοιχείων αυτών και οι αντίστοιχοι χρόνοι ημιζωής είναι οι εξής

$Rb^{87} \rightarrow Sr^{87} + e^-$ (τ = $48.8*10^9$ έτη)

$K^{40} \rightarrow Ca^{40} + e^-$ (τ = $1.47*10^9$ έτη)

$K^{40} + e^- \rightarrow Ar^{40}$ (τ = $11.8*10^9$ έτη)

$U^{238} \rightarrow Pb^{206} + 8a + 6e^-$ (τ = $4.468*10^9$ έτη)

$U^{235} \rightarrow Pb^{207} + 7a + 4e^-$ (τ = $7.038*10^9$ έτη)

$Th^{232} \rightarrow Pb^{208} + 6a + 4e^-$ (τ =$14.008*10^9$ έτη)

$Sm^{147} \rightarrow Nd^{143} + a$ (τ = $1.06*10^{11}$ έτη)

όπου Pb = Μόλυβδος, Ca = Ασβέστιο, Ar = Αργό, Nb = Νεοδήμιο, Sr = Στρόντιο, a = σωμάτιο άλφα και e^- = ηλεκτρόνιο.

Με την παραπάνω μέθοδο της ραδιοχρονολόγησης το πιο μικρό σφάλμα στις χρονολογήσεις είναι γύρω στα 10.000 χρόνια. Ένα σχετικά μικρό διάστημα στη γεωλογική κλίμακα, αλλά και σχετικά μεγάλο για την ακρίβεια που θέλουμε καμιά φορά, αν σκεφτεί κανένας ότι είναι μεγαλύτερο και από το διάστημα μέσα στο οποίο αναπτύχθηκε ολόκληρος ο πολιτισμός του ανθρώπου.

Θα μπορούσαμε να πούμε, λοιπόν, ότι το ραδιενεργό ρολόϊ, όπως και κάθε άλλο ρολόϊ, έχει δυο δείχτες. Ο ένας δείχνει προς την ποσότητα του μητρικού πυρήνα και ο άλλος προς εκείνη του θυγατρικού. Γνώση των δυο αυτών ποσοτήτων μας δίνει αμέσως το χρόνο που πέρασε από τη στιγμή που το ρολόϊ τέθηκε σε κίνηση. Βέβαια, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι άλλες δευτερεύουσες διασπάσεις είναι δυνατόν καμιά φορά να επιδράσουν με βίαιο τρόπο πάνω στην κίνηση των δειχτών, και έτσι ο χρόνος που δείχνει το ρολόϊ να μην είναι αξιόπιστος. Αυτό, όμως, έχουμε τη δυνατότητα να το εξακριβώσουμε στις περισσότερες περιπτώσεις.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ραδιοχρονολόγησης βρίσκουμε ότι τα πιο παλιά πετρώματα έχουν μιαν ηλικία περίπου 3.8 δισεκατομμυρίων χρόνων με ένα σφάλμα της τάξης των 50 με 100 εκατομμυρίων χρόνων. Βρίσκονται στην περιοχή Issua της Γροιλανδίας, και προέρχονται από μεταμόρφωση ιζημάτων στο εσωτερικό της Γης, κάτω από μεγάλη πίεση και θερμοκρασία. Από εκεί στη

συνέχεια ανυψώθηκαν και έφτασαν στην επιφάνεια, στην περιοχή που αναφέραμε. Βέβαια, είναι προφανές ότι η ηλικία της Γης είναι πολύ πιο μεγάλη απ' ότι η ηλικία των παραπάνω πετρωμάτων. Αν θέλουμε λοιπόν να έχουμε κάποια εκτίμηση για το πόσο πιο πριν είχε σχηματιστεί η Γη, όπως και τις συνθήκες που επικρατούσαν στην αρχική φάση της δημιουργίας της πρέπει να ψάξουμε να βρούμε πετρώματα με μεγαλύτερη ηλικία από αυτά της Γροιλανδίας. Δυστυχώς, όμως, οι έντονες γεωλογικές ανακατατάξεις που συνέβησαν σ' όλη τη διάρκεια της γήινης ιστορίας ή έχουν εξαφανίσει τα πετρώματα αυτά ή τα έχουν αποκρύψει σε μέρη που δεν είναι εύκολο να τα βρούμε. Έτσι, πρέπει να στραφούμε σε άλλες πηγές. Δυο τέτοιες πηγές είναι τα πετρώματα της γεωλογικά αδρανούς Σελήνης, και οι μετεωρίτες. Δεν θα πρέπει βέβαια να ξεχνάμε ότι η Σελήνη δημιουργήθηκε είτε την ίδια εποχή με τη Γη, είτε μετά απ' αυτή, και ίσως κατά μια άποψη από τα ίδια της τα σπλάχνα. Μετά την κατάκτηση της Σελήνης από τον άνθρωπο, αναλύσεις στοιχείων που βρίσκονται εκεί έγιναν και εύκολες και κατατοπιστικές. Έτσι, λοιπόν, σήμερα ξέρουμε ότι τα πιο παλιά πετρώματα του δορυφόρου μας έχουν μια ηλικία γύρω στα 4.3 δισεκατομμύρια χρόνια. Κυρίως το στοιχείο αυτό, μαζί με κάποια θεωρητικά μοντέλα μας οδηγούν τελικά στο συμπέρασμα ότι η ηλικία της Γης είναι περίπου 4.6 δισεκατομμύρια χρόνια. Υπάρχει επομένως μια χαμένη ιστορία περίπου 0.8 δισεκατομμυρίων χρόνων, για την οποία δεν έχουμε κανένα χειροπιαστό στοιχείο, παρά μόνο τις θεωρητικές μας προσεγγίσεις. Να σημειώσουμε επίσης ότι το σύμπαν μας έχει μια ηλικία 15 δισεκατομμύρια χρόνια και ότι ο ίδιος ο γαλαξίας μας σαν ένα ενιαίο σύνολο είναι δυο με τρεις φορές πιο γερασμένος απ' ότι το ηλιακό μας σύστημα. Έτσι, εκτιμιέται ότι η γέννηση του γαλαξία μας έγινε αρκετά δισεκατομμύρια χρόνια πριν από το σχηματισμό του ηλιακού μας συστήματος.

Πριν από τη μέθοδο της ραδιοχρονολόγησης οι προσπάθειες για τον καθορισμό της ηλικίας του πλανήτη μας ήταν εντυπωσιακά λαθεμένες. Για παράδειγμα, ο Charles Darwin (Δαρβίνος) με βάση κάποιες εμπειρικές γεωλογικές παρατηρήσεις θεωρούσε ότι η Γη ήταν 300 εκατομμυρίων χρόνων.

Ακόμη πιο παλιά ο Lord Kelvin (J. Thomson) από καθαρά θεωρητικές μελέτες ισχυριζόταν ότι η Γη ήταν μόλις μερικών εκατομμυρίων χρόνων. Σε κάπως πιο πρόσφατες εποχές, βέβαια, η αστρονομία είχε καταφέρει να διορθώσει σημαντικά τις παραπάνω λαθεμένες παρατηρήσεις. Μόνο με τη μέθοδο της ραδιοχρονολόγησης, όμως, τα συμπεράσματά μας απέκτησαν μια στέρεη βάση.

1.5 Η Δημιουργία

Ας έρθουμε τώρα στο δεύτερο ερώτημα, δηλαδή σ' αυτό που αναφέρεται στον τρόπο δημιουργίας του πλανήτη μας. Είναι προφανές βέβαια ότι για να έχουμε μιαν απάντηση στο παραπάνω ερώτημα θα πρέπει να γνωρίζουμε ταυτόχρονα και τον τρόπο σχηματισμού ολόκληρου του πλανητικού μας συστήματος, αναπόσπαστο τμήμα του οποίου είναι η Γη. Σήμερα πιστεύουμε ότι μετά τη μεγάλη έκρηξη που σήμανε τη δμιουργία ολόκληρου του σύμπαντος, το γνωστό big-bang, στην αρχικά ομοιογενή ύλη της έκρηξης δημιουργήθηκαν τοπικές ανωμαλίες που οδήγησαν στο σχηματισμό των γαλαξιών, και νέες τοπικές ανωμαλίες στο εσωτερικό των γαλαξιών που οδήγησαν στο σχηματισμό των αστέρων. (Αστέρι στην αστρονομία θεωρείται εκείνο το ουράνιο σώμα που μπορεί από μόνο του να συντηρήσει θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, όπως ο Ηλιος μας, και είναι επομένως αυτόφωτο). Αυτό που οδήγησε στο σχηματισμό των παραπάνω ουράνιων σωμάτων ήταν η βαρυτική δύναμη που έλκει όλα τα υλικά σώματα μεταξύ τους, σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα, σε πρώτη προσέγγιση. Για κάποιο λόγο λοιπόν, ένα πολύ μεγάλο σύννεφο αστρικής σκόνης που βρισκόταν στη θέση που τώρα βρίσκεται το πλανητικό μας σύστημα, άρχισε κάτω από την επίδραση της βαρύτητας να συρρικνώνεται, ενώ ταυτόχρονα περιστρέφονταν.

Το αρχικό νέφος θα πρέπει να σχημάτιζε δίσκο, δηλαδή να είχε μεγαλύτερη πυκνότητα πάνω σε ένα ορισμένο επίπεδο. Οι βαρυτικές δυνάμεις οδήγησαν στη συνέχεια στο σχηματισμό συγκεκριμένων δαχτυλιδιών, που ήταν σχεδόν

ομόκεντρα, στο ίδιο επίπεδο και πάλι, και χωριζόντουσαν από ένα σχεδόν κενό χώρο. Οι ίδιες δυνάμεις οδήγησαν παραπέρα καθένα δαχτυλίδι σε τοπικές συμπυκνώσεις, που σχημάτισαν τους πρωτοπλανήτες. Οι πρωτοπλανήτες είναι οι θεμέλιοι λίθοι των πλανητών. Σε καθένα δαχτυλίδι, είναι προφανές ότι ο μεγαλύτερος πρωτοπλανήτης άρχισε να κυριαρχεί πάνω στους άλλους, είτε απορροφώντας τους, είτε κάνοντάς τους δορυφόρους. Μ' αυτόν τον τρόπο η Γη απόκτησε το δικό της δορυφόρο, τη Σελήνη. Στο μεταξύ, στο κέντρο του νέφους συγκεντρώθηκε πολύ και πυκνή μάζα, τόση που τα πυρηνικά καύσιμα πυροδοτήθηκαν και η συγκέντρωση αυτή έδωσε ένα αστέρι, τον Ήλιο μας. Περίπου 300 χρόνια πριν από σήμερα, ο Γάλλος Rene Des Cartes (Καρτέσιος) ήταν ο πρώτος που πρότεινε την ιδέα ενός πρωταρχικού ηλιακού νέφους από το οποίο προέκυψε η σημερινή εικόνα του ηλιακού μας συστήματος.

Το μοντέλο αυτό είναι σήμερα πιο επικρατέστερο απέναντι σ' ένα άλλο που ήθελε το σχηματισμό του πλανητικού μας συστήματος από την έλξη πάνω στον Ηλιο ενός άλλου Ηλιου, που πέρασε κοντά του. Έτσι, σύμφωνα με το δεύτερο αυτό μοντέλο μετά τη δημιουργία του Ηλιου μας με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω, το πέρασμα του δεύτερου Ηλιου απόκοψε απ' αυτόν, λόγω της βαρυτικής έλξης που αναπτύχθηκε, ένα μεγάλο κομμάτι. Από το κομμάτι αυτό σχηματίστηκαν οι πλανήτες, και άρα και η Γη μας, που παρέμειναν αιχμάλωτοι του βαρυτικού πεδίου του Ηλιου στη συνέχεια. Σύμφωνα με ένα μοντέλο, ένας δεύτερος Ήλιος ήταν δυνατόν να προκύψει και από δεύτερη μεγάλη εστία συστολής μέσα στο αρχικό νέφος.Οι δυο εστίες εκτιμιέται ότι απείχαν μεταξύ τους μια απόσταση περίπου 100 AU στην περίπτωση αυτή. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι απόψεις σαν την παραπάνω είναι αρκετά παλιές. Ήδη, πρώτος το 1745 ο George de Baffot πρότεινε την ιδέα ότι η προσέγγιση ενός κομήτη στον Ηλιο τράβηξε απ' αυτόν την ύλη από την οποία σχηματίστηκαν στη συνέχεια οι πλανήτες. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που έχει το παραπάνω μοντέλο είναι ότι, σύμφωνα με διάφορους υπολογισμούς, το περισσότερο από το υλικό που τραβήχτηκε από τον Ήλιο μ' αυτόν τον τρόπο εκτιμιέται ότι μετά την

απομάκρυνση του επισκέπτη Ήλιου είτε θα έπεφτε και πάλι πίσω σ' αυτόν είτε θα διασκορπίζονταν στο διάστημα πριν καταφέρει να σχηματίσει κάποιους πλανήτες. Γιαυτό και σήμερα έχει πιά εγκαταλειφθεί.

Η σκηνή σχηματισμού του πλανήτη μας από ένα αρχικό σύννεφο σκόνης και αερίων δεν θα πρέπει να είναι και τόσο σπάνια στο σύμπαν. Θα πρέπει να έχει επαναληφθεί αναρίθμητες φορές στο παρελθόν και θα συνεχίσει να επαναλαμβάνεται και στο μέλλον. Τα ραδιτηλεσκόπια μας δείχνουν επίσης στο εσωτερικό πυκνών σύννεφων αστρικών αερίων σχηματίζονται αστέρια, τα οποία περιβάλλονται από δίσκους. Οι τελευταίοι θα δώσουν τους πλανήτες των αστέρων αυτών. Η ανίχνευση της αστρικής σκόνης και των αερίων γίνεται μεκατάλληλα τηλεσκόπια στο υπέρυθρο μήκος κύματος στο οποίο αυτά παρουσιάζουν έντονη ακτινοβολία. Με τον τρόπο αυτόν έχει ανακαλυφθεί στον αστερισμό του Ταύρου, για παράδειγμα, το αστέρι T - Tauri, το οποίο περιβάλλεται από δίσκο σκόνης και έχει τα ίδια χαρακτηριστικά που είχε ο δικός μας Ηλιος όταν είχε ηλικία ενός εκατομμυρίου χρόνων. Πιό ακριβείς παρατηρήσεις που επιβεβαίωσαν τα παραπάνω έκΑνε επίσης και ένας αστρονομικός δορυφόρος, ο οποίος εκτοξεύθηκε το 1983, και ανίχνευε στο υπέρυθρο μήκος κύματος. Οι παρατηρήσεις του δορυφόρου αυτού έδειξαν ότι η σκόνη γύρω από α αστέρια που διανύουν την νηπιακή φάση της ηλικίας τους σχηματίζει έναν σχεδόν κυκλικό δίσκο, ο οποίος στην πε΄ριπτωση του Αστέρα B - Pictoris είχε διπλάσια διάσταση από αυτή του δικού μας πλαμητικού συστήματος.

Πόσος χρόνος χρειάστηκε για το σχηματισμό του Ηλιου μας και του δίσκου της σκόνης γύρω από αυτόν από τη συστολή των αρχικών υλικών; Μόνο 100000 χρόνια, μιά στιγμή δηλαδή στη γεωλογική κλίμακα. Λόγω της συστολής στο κέντρο αναπτύχθηκαν πολύ μεγάλες θερμοκρασίες οι οποίες έδωσαν το έναυσμα για τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Αρκεί να αναφέρουμε ότι στις αποστάσεις που τώρα βρίσκονατι οι αστεροειδείς η θερμοκρασία θα πρέπει να έφτασε γύρω στους 1200 oC, όπως αποδεικνύεται από τα χαρακτηριστικά των μετεωριτών που πέφτουν κατα καιρούς πάνω στη Γη.

Είναι προφανές ότι εφόσον το ηλιακό μας σύστημα προέκυψε από ένα αρχικό νέφος σκόνης και αερίων, τα διάφορα μέρη του θα πρέπει να έχουν αρκετές ομοιότητες στη χημική τους σύσταση, εκτός κι αν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος λόγος που να δικαιολογεί κάποιες διαφορές. Και πράγματι τέτοιες διαφορές διαπιστώνονται εύκολα και μπορούν να εξηγηθούν. Για παράδειγμα, όπως είναι γνωστό ο Ήλιος αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (H_2), Ηλιο (He) και άζωτο (N), ενώ υπάρχουν και ίχνη από άλλα στοιχεία. Αυτό μας δείχνει ότι ο Ηλιος και οι μεγάλοι πλανήτες συγκέντρωσαν όλο σχεδόν το αέριο υλικό του αρχικού νέφους, ενώ οι πιο μικροί πλανήτες κοντά στον Ηλιο συγκέντρωσαν πετρώδη υλικά. Αυτό εξηγεί, άλλωστε, και τις μεγάλες διαφορές στην πυκνότητα των παραπάνω σωμάτων. Ο λόγος που οι μεγάλοι πλανήτες και ο Ηλιος κατάφεραν να συγκρατήσουν αέριο υλικό, και κυρίως υδρογόνο (H_2) και Ηλιο (He), είναι ότι είχαν μεγάλο βαρυτικό πεδίο. Αντίθετα, στο μικρό βαρυτικό πεδίο των μικρών πλανητών μόνο βαριά στοιχεία ήταν δυνατόν να συγκρατηθούν. Ο μόνος πλανήτης που κατάφερε να κρατήσει το πιο ελαφρύ στοιχείο, το υδρογόνο, σε σημαντικές ποσότητες είναι ο Δίας. Ας μην ξεχνάμε, βέβαια, ότι ο Δίας είναι ο μεγαλύτερος πλανήτης, στην ουσία δε ένας αποτυχημένος δεύτερος Ηλιος του πλανητικού μας συστήματος. Η Σελήνη από την άλλη μεριά και ο Ερμής δεν κατάφεραν να συγκρατήσουν, λόγω του μικρού τους βαρυτικού πεδίου αέρια, και έτσι δεν έχουν καθόλου ατμόσφαιρα. Βέβαια, συγκεκριμένα για τον πλανήτη μας, μεγάλες ποσότητες αερίων που παγιδεύτηκαν στο εσωτερικό του στα πρώτα στάδια του σχηματισμού του ήρθαν στη συνέχεια (και έρχονται και σήμερα) στη επιφάνεια μέσα από την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Τέτοια αέρια είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) το μεθάνιο (CH_4), οι υδρατμοί (H_2O) και διάφορες ενώσεις του θείου, τα οποία καταλήγουν στην ατμόσφαιρα. Εκτιμήσεις για τη σύσταση του αρχικού νέφους μπορούμε να έχουμε και από τους μικρούς αλήτες του ηλιακού μας συστήματος, τους μετεωρίτες, που από καιρό σε καιρό μας επισκέπτονται. Οι μετεωρίτες σχηματίστηκαν κι αυτοί την ίδια εποχή που σχηματίστηκε το πλανητικό μας σύστημα και σήμερα διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές γύρω από τον Ηλιο, οι

οποίες κατά διαστήματα συναντούν τον πλανήτη μας. Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι μετεωρίτες έρχονται από τη ζώνη του σμήνους των αστεροειδών. Οι αστεροειδείς είναι μικρά σώματα που βρίσκονται σε απόσταση από 2.2 έως 3.2 A.U. από τον Ηλιο. Οι μετεωρίτες εκτός των άλλων κουβαλάνε μαζί τους αέρια παγιδευμένα μέσα τους από το πρώτο νέφος, όπως και ραδιενεργά στοιχεία. Τα τελευταία αυτά είναι πολύ χρήσιμα γιατί μπορούν να μας προσδιορίσουν το χρόνο που πέρασε από την εποχή που το νέφος άρχισε να συρρικνώνεται.

Τελικά, το υλικό από το οποίο φτιάχτηκε το πλανητικό μας σύστημα είναι αέρια, πάγος και βράχια από πυρίτιο και οξείδια του σιδήρου και του μαγνησίου, εμπλουτισμένα και με άλλα μέταλλα, κυρίως αλουμίνιο και ασβέστιο. Οι τέσσερις εσωτερικοί πλανήτες, η Σελήνη και τουλάχιστον δυο από τους μεγαλύτερους δορυφόρους του Δία είναι μικροί και πετρώδεις. Μίγμα βράχων και πάγου φτιάχνει το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του Ουρανού, του Ποσειδώνα και ένα μικρότερο ποσοστό από τη μάζα του Κρόνου και του Δία, όπως και το κύριο μέρος της μάζας των δορυφόρων των εξωτερικών πλανητών και των κομητών. Το υδρογόνο (H_2) και το Ηλιο (He) αποτελούν περίπου το 15% της μάζας του Ουρανού, περίπου το 25% της μάζας του Ποσειδώνα, τα 2/3 της μάζας του Κρόνου, και τα 4/5 της μάζας του Δία.

1.6 Τα πρώτα βήματα

Στην αρχική φάση της δημιουργίας της Γης παρατηρήθηκε μιαν αύξηση της μάζας της λόγω της έλξης που ασκούσε πάνω σε αέρια και σκονη που βρισκόντουσαν στη γειτονιά της, και ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας της. Η αύξηση στη θερμοκρασία οφειλόταν σε τρεις προσθετικούς παράγοντες. Στη συρρίκνωση του γήινου όγκου λόγω της βαρύτητας, στην έντονη πρόσκρουση μετεωριτών στην επιφάνειά της, και στην ακτινοβολία διάφορων ραδιενεργών στοιχείων που βρισκοντουσαν στο σύννεφο που συρρικνωνόταν. Να σημειώσουμε

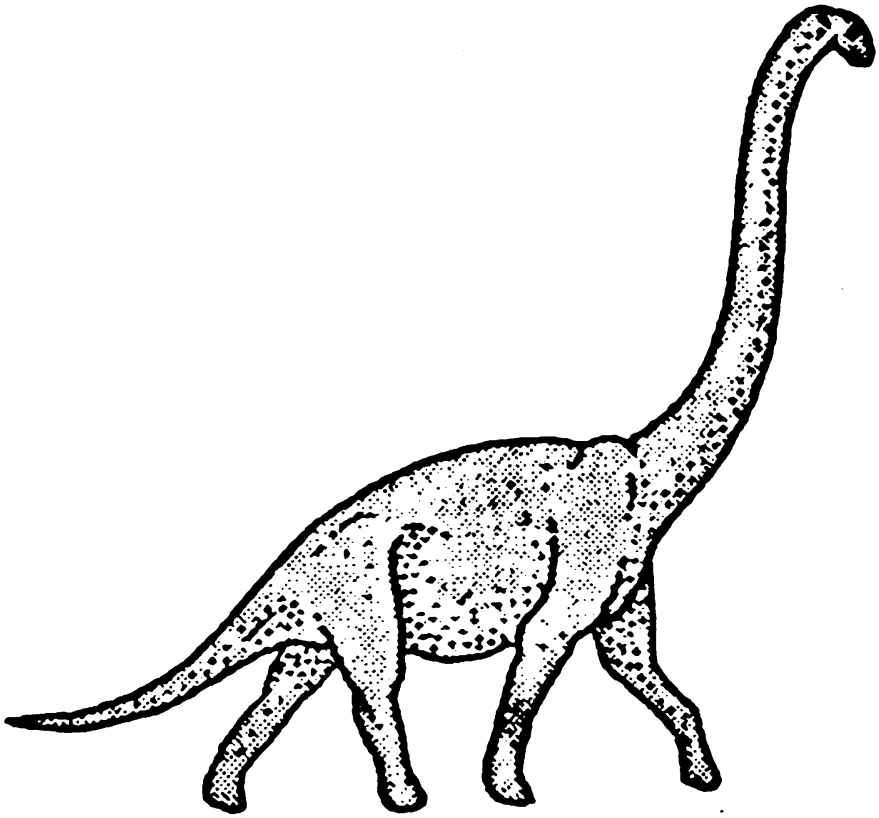
ότι στη Γη θα πρέπει να έπεσαν και μικροί πρωτοπλανήτες, δηλαδή μικρά ουράνια σώματα με διαμορφωμένα τα εσωτερικά και εξωτερικά τους τμήματα, και συγκεκριμένα με σιδηρούχα εσωτερικά τμήματα και πυριτιούχα εξωτερικά. Αυτό υποδηλώνεται από σιδηρούχους μετεωρίτες που έχουν ηλικία 4 με 6 δισεκατομμύρια χρόνια και έχουν τέτοια χαρακτηριστικά (αρχική θερμοκρασία, τρόπος ψύξης κ.λ.π.) τα οποία μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι προέρχονται από πλανητικά σώματα ακτίνας μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων. Η πτώση των σωμάτων αυτών αύξησε επομένως σημαντικά και τη μάζα της Γης και τη θερμοκρασία της.

Είναι σημαντικό ότι οι θεωρίες που προβλέπουν την ιστορική εξέλιξη του πλανήτη μας είδαν το φως της δημοσιότητας πολύ πριν γίνει κατορθωτό, μέσα από διαστημικά ταξίδια επανδρωμένων και μη δορυφόρων, να έρθουμε σε επαφή από κοντινή απόσταση με άλλους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος και με το δορυφόρο μας, τη Σελήνη. Τα ταξίδια αυτά απλά διόρθωσαν και βελτίωσαν κάποια σημεία των θεωριών αυτών.

Το θέμα το οποίο έχει σχέση με την πτώση πάνω στη Γη μεγάλων μετεωριτών και αστεροειδών, τόσο τα πρώτα χρόνια της ζωής της όσο και αργότερα, είναι πάρα πολύ σημαντικό, για λόγους που θα αναλύσουμε και πιο κάτω. Οι γεωεπιστήμονες, λοιπόν, έχουν βαλθεί να αναλύσουν όλα γύρω από αυτό κάπως πιο προσεκτικά τα τελευταία χρόνια. Κατ' αρχάς θα πρέπει να τονίσουμε ότι η πτώση ενός μεγάλου μετεωρίτη πάνω στη Γη είναι ένα εντυπωσιακό από ενεργειακή άποψη γεγονός. Πρόκειται για μια μεγάλη σύγκρουση που οδηγεί σε μια μεγάλη έκρηξη. Πιο συγκεκριμένα, η ανατίναξη όλου του πυρηνικού οπλοστάσιου του πλανήτη μας κατά την εποχή του ψυχρού πολέμου δεν θα μπορούσε να συγκριθεί με την ισχύ της σύγκρουσης ενός μετεωρίτη διαμέτρου 1 km και ταχύτητας 20 km/sec με τη Γη. Οι θερμοκρασίες που θα αναπτύσσονταν στην περιοχή της έκρηξης θα ήταν τόσο υψηλές ώστε θα εξαέρωναν το οποιοδήποτε πέτρωμα, ενώ σκόνη και καπνός θα σκέπαζαν τον Ηλιο.

Πολλοί πιστεύουν ότι ένα τέτοιο βίαιο επεισόδιο ήταν η αιτία που κάποιοι παλιοί βασιλιάδες του πλανήτη μας, οι τρομεροί δεινόσαυροι, έχασαν όχι μόνο το θρόνο τους αλλά και εξαφανίστηκαν για πάντα από πάνω του, δίνοντας από τότε τη θέση τους στα θηλαστικά.

Στην έρημο της Αριζόνα στις ΗΠΑ υπάρχει ο κρατήρας Barringer, ο οποίος έχει έκταση πάνω από ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο. Σχηματίστηκε πριν από 30.000 χρόνια περίπου από την πτώση ενός σιδηρομετεωρίτη. Η λίμνη Annular στο Quebec είναι επίσης μέρος ενός κρατήρα ηλικίας 210 εκατομμυρίων χρόνων, ο οποίος ονομάζεται Manicoygan Η λίμνη αυτή έχει σήμερα διάμετρο 75 χιλιόμετρα, σύμφωνα όμως με μερικές εκτιμήσεις ο κρατήρας θα πρέπει να είχε αρχική διάμετρο πάνω από 100 χιλιόμετρα. Παρόμοιοι μικρότεροι κρατήρες συναντώνται και σε άλλα μέρη της Γης όπως και στη Σελήνη.



Να ήταν άραγε η πτώση ενός μετεωρίτη η αιτία της εξαφάνισης του τρομερού αυτού ερπετού;

Σχήμα 4

Ο σχηματισμός της Γης και η αύξηση του όγκου της θα πρέπει λοιπόν να ήταν ένα έντονα βίαιο επεισόδιο, και μια διαδικασία με συχνές αλλαγές. Οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούσαν έλυωναν πολλά ύλικά, υπήρχε ένα έντονο ανακάτεμα των πάντων, θερμικά ρεύματα από περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας προς περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας, καταβύθιση των βαριών υλικών και ανύψωση των ελαφρών κ.λ.π.

Στη Γη, ο ρυθμός πτώσης μεγάλων μετεωριτών και αστεροειδών είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, επειδή η διάβρωση και η αλλοίωση του γήινου φλοιού καταστρέφει τους κρατήρες που δημιουργούνται, οι οποίοι, όπως είναι φυσικό, είναι από τα πιο σημαντικά ίχνη τέτοιων πτώσεων. Αυτό μπορεί να γίνει στη Σελήνη, όμως, η οποία είναι γεωλογικά αδρανής, και στην οποία ο πιόπάνω ρυθμός θα πρέπει να είναι σχεδόν ο ίδιος μ' αυτόν της Γης, μια και τα δυο αυτά ουράνια σώματα είναι πολύ κοντά. Πιο συγκεκριμένα ο ρυθμός αυτός θα πρέπει να είναι λίγο πιο μεγάλος στη Γη, λόγω του μεγαλύτερου βαρυτικού της πεδίου. Η γεωλογική αδράνεια της Σελήνης της επιτρέπει να διατηρήσει έναν κρατήρα σε καλή κατάσταση 100 φορές πιο πολύ χρόνο απ' ότι η Γη.

Από μετρήσεις που έκανε η Αμερικανική αποστολή του "Apollo" στη Σελήνη, μετρήθηκε ο ρυθμός πτώσης αστεροειδών και μετεωριτών σ' αυτή και διαπιστώθηκε ότι αυτός παραμένει σταθερός τα τελευταία 3 δισεκατομμύρια χρόνια. Έτσι, λοιπόν, δεν μπορεί παρά η πτώση αυτών των σωμάτων να αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο στην εξέλιξη και της Γης και της Σελήνης. Εκτιμιέται ότι κάθε 1 εκατομμύριο χρόνια πέφτουν πάνω στη Γη 1 με 3 μετεωρίτες ή αστεροειδείς, που ανοίγουν κρατήρες με διάμετρο μεγαλύτερη των 20 km. Η μέση ταχύτητα αυτών των σωμάτων πρέπει να είναι γύρω στα 25 km/sec. Να σημειώσουμε ότι εάν η μάζα ενός σώματος είναι μικρότερη από 100 τόνους, τότε λόγω της αντίστασης του ατμοσφαιρικού αέρα, η ταχύτητα με την οποία αυτό χτυπά τη γήινη επιφάνεια είναι περίπου η μισή της ταχύτητας που είχε στην είσοδό του στην ατμόσφαιρα. Καθώς η μάζα του αυξάνει, όμως, τόσο και η επίδραση της ατμόσφαιρας πάνω στην ταχύτητά του γίνεται πιο μικρή, και για σώματα με μάζα μεγαλύτερη από

1000 τόνους η επίδραση της ατμόσφαιρας γίνεται σχεδόν μηδαμινή. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την πτώση είναι πάνω από 10^{27} erg. Αυτό έχει σα συνέπεια η θερμοκρασία στην περιοχή της πτώσης να ανέρχεται σε πολλές χιλιάδες ^{o}C, ενώ η πίεση πάνω στα πετρώματα είναι πάνω από ένα εκατομμύριο ατμόσφαιρες. Για σύγκριση να αναφέρουμε ότι 10^{27} erg απελεθερώνονται σε ένα σεισμό μεγέθους 10 της κλίμακας Richter.

Μέχρι στιγμής στη Γη έχουν ανακαλυφθεί 120 μεγάλοι κρατήρες, και ο αριθμός αυτός περιμένουμε να αυξηθεί λίγο, μιας και κάθε χρόνο ανακαλύπτονται μερικοί καινούριοι. Η ηλικία τους κυμαίνεται από 2 δισεκατομμύρια έως μερικές χιλιάδες χρόνια. Οι πιο παλιοί καταστράφηκαν από τη διάβρωση και την αλλοίωση του γήινου φλοιού λόγω των ηπειρωτικών μετατοπίσεων. Παραπέρα, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι ζούμε σε έναν υγρό πλανήτη, και επομένως το 70% των μετεωριτών και των αστεροειδών θα πρέπει να έχουν πέσει στους ωκεανούς. Δυστυχώς ο μόνος κρατήρας που έχει βρεθεί στο νερό είναι στα αβαθή νερά της Nova Scotia, και ονομάζεται Montagnais Structure. Έχει ηλικία 50 εκατομμυρίων χρόνων και διάμετρο 60 km. Οι υπόλοιποι κρατήρες θα πρέπει να είναι σε πολύ πιο βαθιά νερά.

Στα ακόμη πιο παλιά χρόνια, δηλαδή πριν από τα 3 δισεκατομμύρια χρόνια, η πτώση των μετεωριτών και των αστεροειδών πρέπει να γινόταν με πολύ μεγαλυτερο ρυθμό μιας και υπήρχαν περισσότερα τέτοια σώματα στον περίγυρό μας. Έτσι, πριν από 4 δισεκατομμύρια χρόνια ο ρυθμός αυτός μπορεί να ήταν και 100 φορές μεγαλύτερος απ' ότι σε πιο πρόσφατους γεωλογικά χρόνους. Η μεγάλη αυτή "βροχή" μετεωριτών εκτός του ότι δημιουργούσε πολύ αντίξοες συνθήκες για την ανάπτυξη της ζωής κατέστρεφε επίσης και τον ομαλό σχηματισμό πετρωμάτων. Ίσως, λοιπόν, αυτός να είναι ένας από τους λόγους που δεν έχουμε βρει στη Γη πετρώματα με ηλικία μεγαλύτερη από 3.8 δισεκατομμύρια χρόνια. Δεν θα πρέπει επίσης να περάσει απαρατήρητο ότι η πτώση ενός μεγάλου μετεωρίτη ίσως μετέβαλε και τις ποσότητες που χαρακτηρίζουν την περιστροφή της Γης γύρω από τον εαυτό της (άξονας περιστροφής, γωνιακή ταχύτητα περιστροφής). Για

παράδειγμα, είναι εξακριβωμένο ότι ολόκληρη η Σελήνη κατά καιρούς αναγκάστηκε να επαναπροσανατολίσει τον άξονα περιστροφής της, λόγω της πτώσης επάνω της πολύ μεγάλων μετεωριτών.

Υπάρχει μάλιστα η θεωρία ότι η Σελήνη είναι το αποτέλεσμα της σύγκρουσης της Γης με ένα πολύ μεγάλο σχετικά αστρικό σώμα, των διαστάσεων του Άρη. Η σκόνη και τα αέρια που εκσφενδονίστηκαν στα ύψη από μια τέτοια τρομακτική σύγκρουση ήταν τόσο πολλά, ώστε κάτω από την επίδραση του βαρυτικού τους πεδίου συγκεντρώθηκαν σε μια περιοχή και σχημάτισαν το δορυφόρο της Γης. Η άποψη αυτή ενισχύεται από το ότι η χημεία δειγμάτων ορυκτών από τη Σελήνη μοιάζει με αυτή γήινων πετρωμάτων που βρίσκοντα στο μανδύα, σε βάθος δηλαδή πάνω από 50 km. Σε μια τρομαχτική σύγκρουση όπως η παραπάνω, είναι προφανές ότι ακόμη και από πιο βαθιά στρώματα του πλανήτη μας θα εκτινάχθηκαν υλικά στα ύψη. Επιπρόσθετα, στα παραπάνω συνηγορεί και το γεγονός ότι η Σελήνη έχει έναν ασυνήθιστα μικρό πυρήνα από σίδηρο, τον οποίο ίσως να της τον προμήθευσε η Γη. Όπως είπαμε, όμως, ενδέχεται η Σελήνη να σχηματίστηκε σχεδόν ταυτόχρονα με τη Γη, από υλικά που βρισκόντουσαν στο ίδιο περιφερειακό δαχτυλίδι γύρω από τον Ηλιο.

Στην περίπτωση πάντως που η Σελήνη σχηματίστηκε πράγματι από τη σύγκρουση της Γης με ένα άλλο ουράνιο σώμα, το τελευταίο θα πρέπει να είχε τις διαστάσεις του Αρη και ταχύτητα τουλάχιστον δέκα φορές την ταχύτητα του βλήματος ενός συνηθισμένου πυροβόλου. Από τα υλικά που εκτινάχθηκαν στο διάστημα η Σελήνη εκτιμιέται ότι σχηματίστηκε σε διάστημα μόνο μιάς ημέρας, σε απειροελάχιστο δηλαδή χρόνο στη γεωλογική κλίμακα,

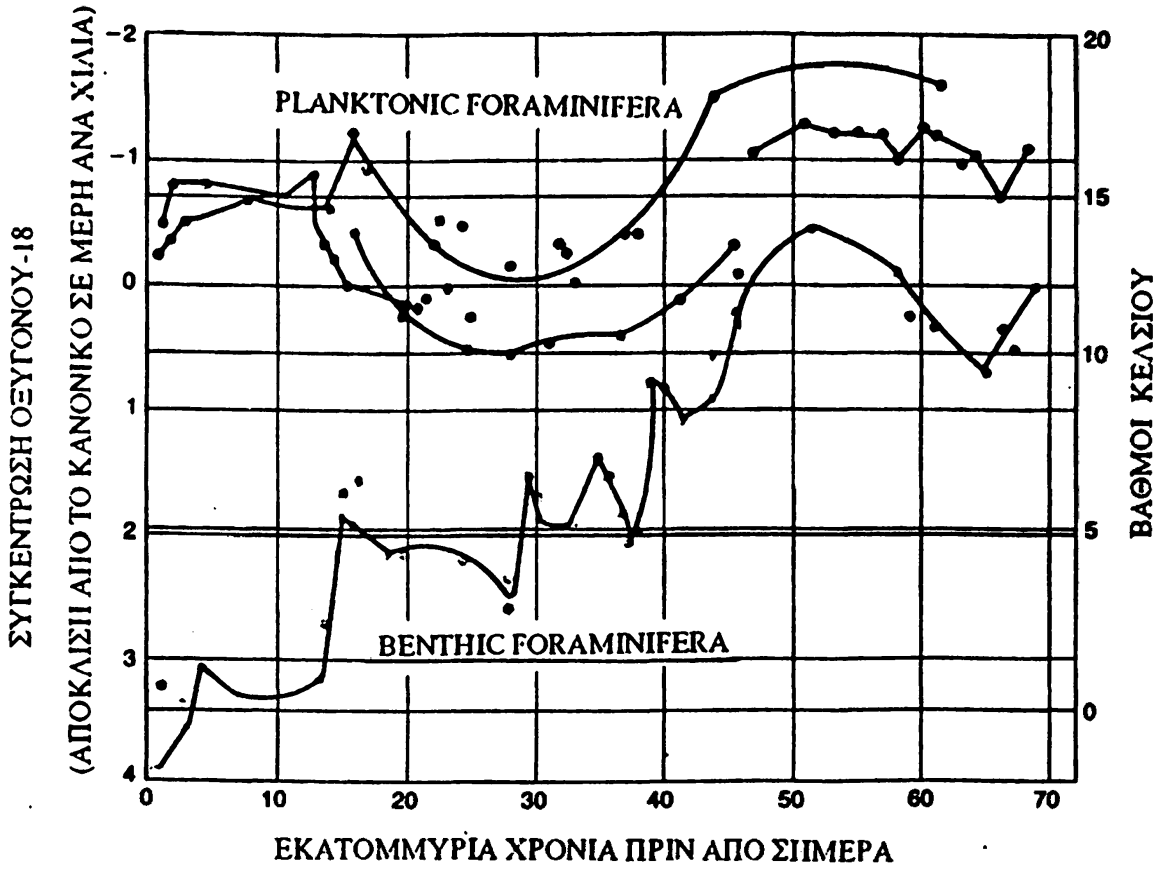
Ας συνεχίσουμε, όμως, μένοντας στα πολύ βασικά σημεία, μιας και αρκετές λεπτομέρειες που μας ενδιαφέρουν θα τις γνωρίσουμε αργότερα. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούσαν αρχικά στη Γη (πάνω από το σημείο τήξης του σιδήρου, που είναι 1539 ^{o}C) είναι προφανές ότι δεν επέτρεπαν στους υδρατμούς που υπηρχαν στην ατμόσφαιρά της να υγροποιηθούν. Πολύ υψηλές ήταν επίσης και οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό της Γης, με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιο

έντονα και τα θερμικά ρεύματα που δημιουργούνται εκεί. Τα ρεύματα αυτά, όπως θα δούμε, είναι η πιο σημαντική αιτία για τα γεωλογικά φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν. Όταν, πάντως, οι αιτίες που τροφοδοτούσαν τη Γη με θερμότητα σταμάτησαν ή έχασαν πολύ από τη δυναμική τους, η πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας κατ' αρχάς και του εσωτερικού στη συνέχεια ήταν ένα αναπόφευκτο θερμοδυναμικό αποτέλεσμα.Μιας και η επιφάνεια της Γης σε βάθος πολλών χιλιομέτρων είναι κακός αγωγός της θερμότητας, η πτώση της θερμοκρασίας του εσωτερικού της Γης είναι προφανές ότι ήταν πιο μικρή απ' ότι αυτή της επιφάνειάς της.

Για να μπορέσει κανένας να εκτιμήσει τις συνθήκες που επικρατούσαν στη Γη στα πρώτα χρόνια της ζωής της πρέπει επίσης να έχει μιαν εκτίμηση για την κατάσταση στην οποία βρισκόταν ο Ηλιος και η ατμόσφαιρά της. Για τον Ηλιο, τα πράγματα είναι σχετικά εύκολα, και από αστρονομικές παρατηρήσεις σε ήλιους άλλων πλανητικών συστημάτων που βρίσκονται σήμερα σε νεαρή ηλικία, αλλά και από τα θεωρητικά μοντέλα. Και τα δυο πάντως συμφωνούν ότι η ισχύς που ακτινοβολούσε ο Ηλιος μας ήταν τα πρώτα εκείνα χρόνια σημαντικά μικρότερη απ' ότι σήμερα και συγκεκριμένα μειωμένη κατά 40%. Αυτό όμως δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι η συνολική ενέργεια που αποταμίευε η Γη ήταν μικρότερη από τη σημερινή, μιας και η διαφορετική σύσταση της ατμόσφαιράς της, της έδινε τη δυνατότητα να παγιδεύει περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία απ' ότι σήμερα, μέσα από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πράγματι, εκτιμάμε ότι εκείνα τα πρώτα χρόνια υπήρχε στην ατμόσφαιρα 100 με 1000 φορές περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα, ένα αέριο που κύρια συμβάλλει στο παραπάνω φιανόμενο. Το γεγονός αυτό, μαζί με το ότι στις πρώτες στιγμές της ζωής της υπήρχε στη Γη αρκετή από την πρωταρχική θερμότητα σχηματισμού της, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της ήταν αρκετά πιο υψηλή απ' ότι σήμερα.

Καθώς πάντως ο καιρός περνούσε και η Γη κρύωνε, μερικοί από τους ατμοσφαιρικούς υδρατμούς υγροποιήθηκαν και έτσι πάνω ψηλά σχηματίστηκαν τα πρώτα σύννεφα. Στο επόμενο στάδιο τα πρώτα σύννεφα άρχισαν να ρίχνουν

βροχή, αλλά μόνο στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Κι' αυτό γιατί καθώς οι σταγόνες της βροχής πλησίαζαν το ζεστό φλοιό της Γης εξατμιζόντουσαν πριν φτάσουν σ' αυτόν για να καταλήξουν και πάλι υγροποιημένες σε κάποιο σύννεφο. Πέρασαν εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια έως ότου η πρώτη βροχή καταφέρει να φτάσει στη



Ο λόγος των ισοτόπων του οξυγόνου - 18 και οξυγόνου - 16 είναι ένα πολύ καλό παλαιοθερμόμετρο. Από μετρήσεις του σε ιζήματα των μικροσκοπικών θαλάσσιων οργανισμών foraminifera φαίνεται η σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας στο βυθό των ωκεανών τα τελευταία 70 εκατομμύρια χρόνια. Στο πιό παλιό παρελθόν οι θερμοκρασίες ήταν ακόμη πιό μεγάλες κατά μέσον όρο.

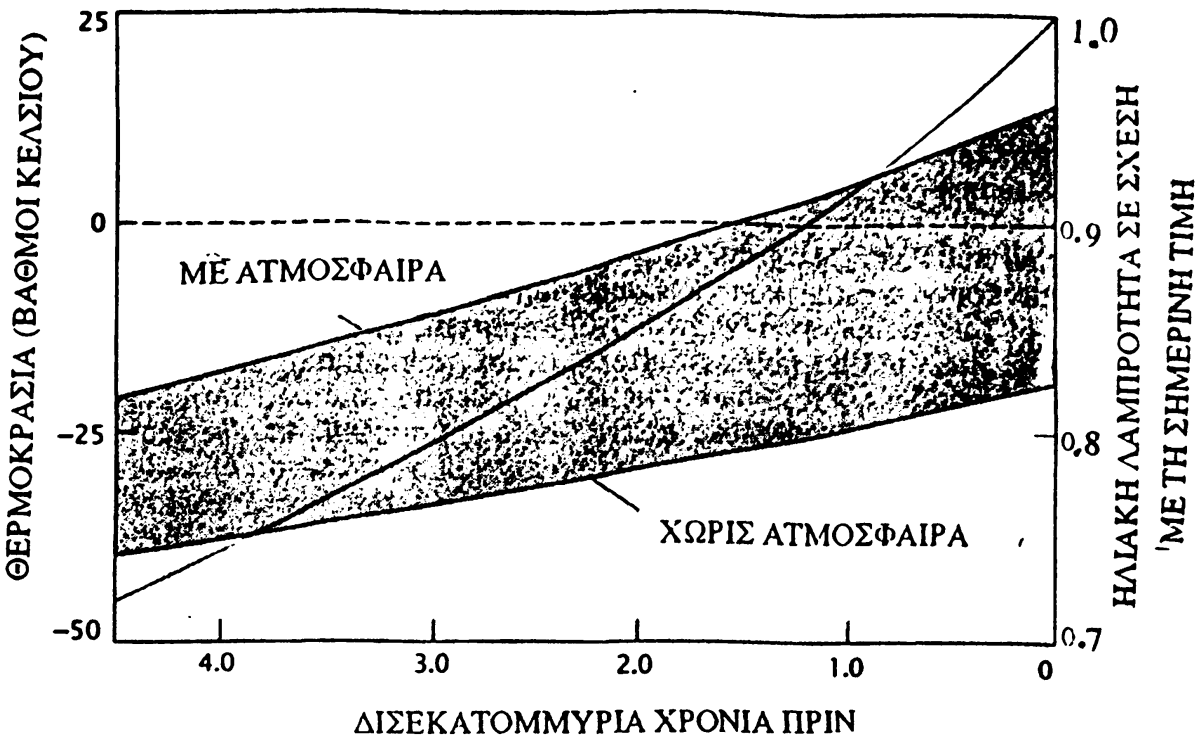
Σχήμα 5

γήινη επιφάνεια πριν εξατμιστεί. Βέβαια η Γη ήταν αρκετά ζεστή ακόμη, και έτσι η εξάτμιση του νερού ήταν γρήγορη. Είχαμε λοιπόν, μια συνεχή έντονη βροχόπτωση στη Γη, που πιστεύεται ότι κράτησε αδιάκοπα επί 40.000 χρόνια, ή και περισσότερο.

Οι βροχοπτώσεις αυτές ξέπλυναν την ατμόσφαιρα από ένα μεγάλο μέρος του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), το οποίο το ανακάτεψαν με το χώμα και σχημάτισαν ανθρακούχα πετρώματα, ή κατέληξε στους ωκεανούς, οι οποίοι κατακρατούν σήμερα 60 φορές περισσότερο από το αέριο αυτό απ' ότι η ατμόσφαιρα. Είναι σημαντικό, πάντως, να σημειώσουμε ότι η χημική εξέταση των παλιών πετρωμάτων της Γροιλανδίας δείχνει ότι κατά τη εποχή του σχηματισμού τους (3.8 δισ. χρόνια πριν) υπήρχε νερό στην επιφάνεια της Γης.

Εκτός από υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα, η πρώτη γήινη ατμόσφαιρα περιείχε ακόμη, μεθάνιο, αμωνία, άζωτο, υδρογόνο, υδρόθειο, μονοξείδιο του άνθρακα κ.λ.π., αλλά πουθενά οξυγόνο. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι η σημερινή σύνθεση της ατμόσφαιρας δεν έχει και πολύ μεγάλη σχέση με το αρχικό σύννεφο αερίων και σκόνης που η συστολή του οδήγησε στο σχηματισμό του πλανήτη μας, και έδωσε και την πρώτη του ατμόσφαιρα. Για να καταφέρει να αποκτήσει τη σημερινή της ατμόσφαιρα η Γη πέρασε από πολλές και σημαντικές αλλαγές. Το τόσο σημαντικό για τη ζωή μας οξυγόνο, για παράδειγμα, είναι αποτέλεσμα μετέπειτα χημικών διεργασιών που έχουν σχέση με τη φωτοσύνθεση. Έτσι, το ατμοσφαιρικό οξυγόνο το προμήθευαν οι οργανισμοί εκείνοι που απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και, με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας, εκπνέουν οξυγόνο. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι η εμφάνιση της ζωής και η αύξηση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου είναι δυο φαινόμενα που πάνε χέρι-χέρι. Το ένα εξαρτιέται από το άλλο και το τροφοδοτεί.

Η έντονη βροχόπτωση και οι μάλλον υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες τα πρώτα εκείνα χρόνια είχαν σαν αποτέλεσμα η Γη να πλημμυρίζει με νερό. Πουθενά πάγος, που σήμερα αποταμιεύει μια μεγάλη ποσότητα νερού στους πόλους. Κάποιος, δηλαδή, που θα έβλεπε τη Γη από μακριά, θα έβλεπε έναν υγρό



Σύμφωνα με όλους τους υπολογισμούς ο πλανήτης μας θα πάγωνε τελείως εάν η ατμόσφαιρά του είχε τα πρώτα χρόνια της δημιουργίας του την ίδια σύνθεση που έχει και σήμερα. Η επάνω καμπύλη δείχνει την επιφανειακή θερμοκρασία που θα είχε ο πλανήτης μας με ένα ποσοστό διοξειδίου το άνθρακα στην ατμόσφαιρά του ίσο με το σημερινό. Η κάτω καμπύλη δείχνει τη θερμοκρασία που θα είχε ο πλανήτης μας εάν δεν είχε καθόλου ατμόσφαιρα. Η αύξηση που παρατηρείται στην καμπύλη αυτή με το χρόνο οφείλεται στην αύξηση της ενέργειας που ακτινοβολεί ο Ηλιος προς τη Γη. Την αύξηση αυτή δείχνει η τρίτη καμπύλη. Η σκιασμένη περιοχή ανάμεσα στις δυό πρώτες καμπύλες αντιστοιχεί στη συνεισφορά του φαινομένου του θερμοκηπίου στην επιφανειακή θερμοκρασία της Γης.

Σχήμα 6

πλανήτη. Μόνο τα πιο ψηλά τμήματα της ξηράς κατόρθωναν να σηκώσουν και να βγάλουν το κεφάλι τους έξω από το νερό πού και πού, τελείως απομονωμένα μεταξύ τους. Έπρεπε να περάσουν πολλά χρόνια έως ότου η πτώση της θερμοκρασίας γίνει τόση, ώστε να έχουμε σημαντική και συνεχή αύξηση των πολικών παγετώνων , απόσυρση των νερών και εμφάνιση μεγάλων τμημάτων ξηράς. Από γεωλογική άποψη, η Γη άρχισε να παίρνει τη μορφή με την οποία μας είναι γνωστή σήμερα σχετικά πρόσφατα στη γεωλογική κλίμακα.

Εκτιμήσεις για τη θερμοκρασία της Γης τα πρώτα χρόνια της δημιουργίας της παίρνουμε από πολλές πηγές. Για παράδειγμα, σε ωκεάνεια ιζήματα εξετάζουμε το λόγο των ισοτόπων οξυγόνο -16 και οξυγόνο -18, ενώ σε υδατογενή πετρώματα ηλικίας 3.5 δισεκατομμυρίων χρόνων εξετάζουμε το λόγο του δευτέριου (D) προς το κανονικό υδρογόνο. Ο λόγος των ισοτόπων του οξυγόνου εξετάζεται σε ωκεάνεια ιζήματα που σχημάτισαν τα κελύφη από ανθρακικό ασβέστιο μικρότατων ζώων που ζουν στο βυθό των ωκεανών (benthic foraminifera), απ' όπου καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μέση θερμοκρασία στο βυθό των ωκεανών ήταν 15 ^{o}C, από την περίοδο 150 εκ. έως 50 εκ. χρόνια πριν. Να σμειώσουμε ότι σήμερα στο βυθό των ωκεανών η θερμοκρασία είναι κοντά στους μηδέν βαθμούς. Από την άλλη μεριά, ο λόγος των ισοτόπων του υδρογόνου μας δείχνει ότι η θερμοκρασία στον ωκεανό που σχηματίστηκε το πέτρωμα ήταν κατά 50 ^{o}C μεγαλύτερη απ' ότι σήμερα. Τα πετρώματα της Γροιλανδίας επίσης, που όπως είδαμε είναι τα πιο παλιά του πλανήτη μας, μας δείχνουν ότι σχηματίστηκαν σε θερμοκρασία αρκετά υψηλή.

Τόσο στην Ανταρκτική όσο και στη Γροιλανδία επίσης βρίσκονται λιθανθρακοφόρα στρώματα τροπικών φυτών ηλικίας 600 εκατομμυρίων χρόνων, που αποδεικνύουν ότι κάποτε ακόμη και εκεί ευδοκιμούσαν τέτοια φυτά. Αν και αυτό βέβαια πρέπει να το 'δεί κάποιος με αρκετό σκεπτικισμό, μιας και πριν από τόσα χρόνια η κατανομή των ηπείρων δεν ήταν ίδια με τη σημερινή, εντούτοις δεν μπορεί παρά να το λάβει υπόψη του. Παραπέρα δε σε νεώτερες εποχές ανάμεσα σε 345 και 280 εκατομμύρια χρόνια (εποχή λιθανθρακοφόρου) στρώματα

λιθανθράκων βρίσκονται σε όλες τις περιοχές της Γης, αποδεικνύοντας έτσι ότι πράγματι το κλίμα ήταν πιο ζεστό, επιτρέποντας το σχηματισμό δασών σε όλες τις ηπείρους.

Η διαφορετική επίσης κατανομή των ηπείρων οδηγούσε και σε διαφορετική κυκλοφορία τα ρεύματα της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, επιτρέποντας συνήθως μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας πάνω στη Γη. Θα πρέπει δε να σημειώσουμε ότι ο χωρισμός της Γης σε κλιματικές ζώνες είναι σχετικά πρόσφατος ενώ τα παλιότερα χρόνια δεν υπήρχε τέτοιος χωρισμός. Για παράδειγμα, πριν από 100 εκατομμύρια χρόνια ο Αρκτικός και ο Ειρηνικός ήταν ενωμένοι, μιας και η Β. Αμερική ήταν πολύ μακριά από τη Σιβηρία. Αυτό επέτρεπε καλύτερη κυκλοφορία τόσο των ωκεάνειων ρευμάτων από τον Ειρηνικό προς τον Αρκτικό ωκεανό, όσο και του αέρα, έτσι που ο τελευταίος είχε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη σημερινή, και κυρίως δεν είχε πάγους. Καθώς όμως οι δυο παραπάνω ήπειροι πλησίαζαν η μια την άλλη, οι δυο ωκεανοί χωρίστηκαν με μόνο σημείο επικοινωνίας τους πια το στενό του Βερίγγειου Πορθμού. Η κυκλοφορία προς τον Αρκτικό ωκεανό σταμάτησε, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του τελευταίου να πέσει σημαντικά.

Σημαντικός σταθμός στην ιστορία της Γης ήτανι και η εμφάνιση της ζωής σ' αυτήν. Στα πρώτα στάδια της δημιουργίας της, οι συνθήκες, όπως είδαμε, ήταν εχθρικές και το περιβάλλον αφιλόξενο. Πριν από 4 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια, όταν εκτιμιέται ότι πρωτοεμφανίστηκε η ζωή στη Γη, οι επιφανειακές θερμοκρασίες ήταν γύρω στους 100 ^{o}C. Όσο όμως τα πράγματα καλυτέρευαν, άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους οι πρώτες απλές και αρκετά ατελείς με τα μέτρα του σήμερα μορφές. Από τη στιγμή που τα πρώτα αρχικά βήματα κρίθηκαν πετυχημένα, η πορεία προς πιο σύνθετους οργανισμούς ακολούθησε επιταχυνόμενους ρυθμούς. Φαίνεται, πάντως, ότι και η ίδια η εμφάνιση της ζωής συνέβαλε στη σημαντική πτώση της θερμοκρασίας του πλανήτη μας, και μάλιστα, σύμφωνα με κάποιους υπολογισμούς, από μόνη την εμφάνιση της ζωής η Γη έχει ψυχθεί μέχρι σήμερα κατά 30 με 45 ^{o}C. Η ανάπτυξη φωτοσυνθετικών

οργανισμών, για παράδειγμα, απομάκρυνε από την ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και επομένως μείωσε σημαντικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δημιουργώντας ένα πιό φιλόξενο περιβάλλον γιά άλλους οργανισμούς. Το πιό σημαντικό όμως είναι ότι οι ζωντανοί οργανισμοί επιταχύνουν τη χημική διάβρωση που παρατηρείται στην επιφάνεια του πλανήτη μας τουλάχιστον κατά 100 φορές, μεταβάλλοντας έτσι τις διάφορες ισορροπίες προς μιά συγκεκριμένη κατεύθυνση.,

Υπάρχειμάλιστα μιά άποψη (Gaia Hypothesiw) σύμφωνα με την οποίαν δεν είναι σωστό να λέμε ότι η ζωή προσαρμόζεται στις γήινες συνθήκες, αλαλά ότι η ίδια η ζωή αλλάζει συνεχώς τις συνθήκες αυτές.

Στο Εθνικό Πάρκο της περιοχής Yelowstone του Wyoming των ΗΠΑ υπάρχουν και σήμερα θερμόφιλα βακτήρια, κατάλοιπα εκείνης της μακρυνής εποχής, τα οποία ζουν στο νερό ζεστών πηγών, των οποίων η θερμοκρασία πλησιάζει στους 100 ^{o}C.Καμιά άλλη μορφή ζωής πάνω στη Γη δεν μπορεί να επιζήσει σε τέτοιο περιβάλλον

Σε σχέση με την εμφάνιση της ζωής, μια από τις μεγαλύτερες αλλαγές στην ιστορία της Γης, και ίσως η πιο σημαντική και από γεωφυσική άποψη, είναι αυτή που συνέβηκε ανάμεσα στην Προκαμβριανή και Καμβριανή περιοδο (όπως αποκαλούνται δυο μεγάλοι περίοδοι της γήινης ιστορίας), δηλαδή πριν 570 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Είναι η εποχή του αποκαλούμενου Φανεροζωϊκού αιώνα. Τότε, για πρώτη φορά παρατηρείται η εμφάνιση οργανισμών με κελύφη. Σήμερα μπορούμε να δούμε τα απολιθώματα των οργανισμών αυτών, σε διάφορα πετρώματα σε πολλά μέρη, και έτσι να τα χρονολογήσουμε. Έχουμε, λοιπόν, από τότε πιο άμεσα καταγραμμένες τις μορφές της ζωής που εμφανίζονται. Ο πλανήτης μας την εποχή εκείνη ήταν πια στην ώριμη ηλικία του.

Σε σχέση με τη βιόσφαιρα, πάντως, η πορεία του πλανήτη μας δεν ήταν πάντοτε ομαλή, αλλά υπήρξαν εποχές στις οποίες σημειώθηκαν σ' αυτόν εντυπωσιακές κλιματολογικές αλλαγές, με όλα τα αναπόφευκτα επακόλουθα που έχουν οι τελευταίες πάνω στην εξέλιξη της ζωής. Οι παραπάνω αλλαγές αφορούν

κύρια στον κύκλο του νερού που υπάρχει αποθηκευμένο σε τρεις μεγάλες δεξαμενές. Στους πάγους, στους ωκεανούς και στην ατμόσφαιρα. Σε περιόδους ομαλών συνθηκών ανάμεσα στις τρεις αυτές δεξαμενές υπάρχει ισορροπία. Σε περιόδους όμως απότομων αλλαγών η ισορροπία αυτή καταστρέφεται προς όφελος μιας δεξαμενής και σε βάρος των άλλων. Ο ρόλος του νερού και της ατμόσφαιρας φαίνονται στη Σελήνη, η οποία μιας και της λείπουν και τα δυο ψύχθηκε σχετικά πολύ νωρίς, χωρίς να υποστεί σχεδόν καμιά γεωλογική μεταβολή στην ιστορία της. Όλες οι σημαντικές αλλαγές που μας ενδιαφέρουν εδώ σε μια πρώτη προσέγγιση αναφέρονται στην ανατροπή της ισορροπίας υπέρ της δεξαμενής των πάγων. Οι εποχές στις οποίες συμβαίνει αυτό ονομάζονται εποχές των παγετώνων. Κατά τις εποχές των παγετώνων μεγάλες ποσότητες νερού μεταφέρθηκαν από την ωκεάνεια δεξαμενή στη δεξαμενή των πάγων, με άμεσο επακόλουθο την εντυπωσιακή αλλαγή του κλίματος της Γης. Ταυτόχρονα, η μείωση της ωκεάνειας δεξαμενής οδήγησε σε σημαντική πτώση της στάθμης της θάλασσας και σε αποκάλυψη μεγάλων τμημάτων ξηράς, τα οποία ήταν καλυμένα πριν με νερό. Στο θέμα όμως αυτό θα επανέλθουμε παρακάτω.

Αφού γνωρίσαμε κάποια πρώτα εισαγωγικά στοιχεία για τον πλανήτη μας, είναι καιρός να αρχίσουμε μια πιο λεπτομερειακή εξέτασή του. Άλλωστε, έχει τόσα πολλά και ενδιαφέροντα να μας 'πεί. Για λόγους που θα γίνουν αργότερα κατανοητοί θα αρχίσουμε την περιήγησή μας από τα σπλάχνα του.

ΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΝΑ ΤΑΞΙΔΙ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

2.1 Διαβάζοντας τις ακτινογραφίες του πλανήτη μας

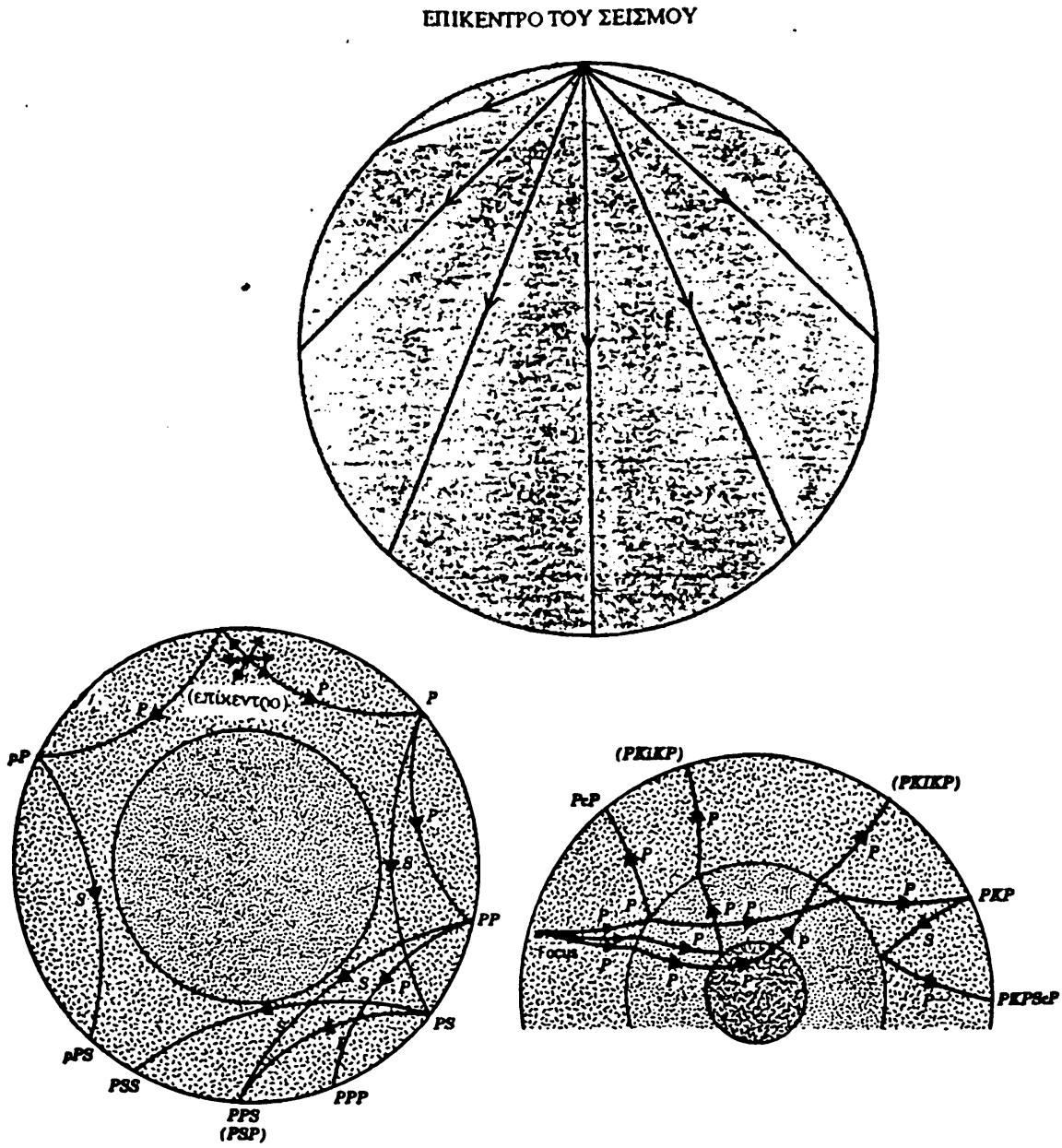
Αν ρίξουμε μια ματιά στην επιφάνεια της Γης διαπιστώνουμε ότι πάνω της, αλλά και ψηλότερα απ' αυτή, υπάρχει διαρκής κίνηση. Υπάρχει η κίνηση των ζωντανών οργανισμών, αλλά και της ανόργανης ύλης που αναφέρεται κυρίως στα μετεωρολογικά φαινόμενα και στη διαταραχή ή ροή των νερών. Η ίδια όμως η στεριά που πάνω της γίνονται όλ' αυτά είναι τελείως ακίνητη. Ή ακόμη κι αν κι αυτή έχει κάποια κίνηση, όπως θα δούμε παρακάτω, η κίνηση αυτή θα πρέπει να είναι τελείως ανεπαίσθητη σε σχέση με όλες τις άλλες. Ξέρουμε βέβαια ότι η έκρηξη σε κάποιο λατομείο, το πέρασμα ενός μεγάλου φορτηγού, η λειτουργία ενός εκσκαφέα, μια κατολίσθηση κ.λ.π. μπορούν να τραντάξουν λίγο ή να αλλοιώσουν το γήινο φλοιό, αλλά τα φαινόμενα αυτά έχουν την ίδια βαρύτητα που έχει και ένας ψύλλος που κάθεται πάνω σ' έναν ελέφαντα. Σημαντικό ρόλο στην αλλοίωση της γήινης επιφάνειας παίζει και η διάβρωση. Έτσι, έχει υπολογιστεί ότι κάθε χρόνο περίπου 10^{16} gr στερεού εδάφους μετακινούνται από τη διάβρωση (ποταμούς, ανέμους) κ.λ.π. Άλλο από το υλικό αυτό απλά εναποτίθεται σε κάποιο άλλο σημείο της στεριάς και άλλο καταλήγει στις θάλασσες ή τις λίμνες. Πρέπει να περάσουν πολλά χρόνια όμως για να μας δώσει η διάβρωση κάποιο αισθητό

αποτέλεσμα. Η γεωφυσική, πάντως, μας διδάσκει ότι η ακινησία της γήινης επιφάνειας δεν ισχύει για χρόνους της γεωλογικής κλίμακας, δηλαδή της τάξης των εκατομμυρίων ετών. Για παράδειγμα ο σχηματισμός των βουνών είναι ένα ρυτίδωμα ή μια αναδίπλωση που συμβαίνει στη επιφάνεια του πλανήτη μας κατά τη διάρκεια τόσο μεγάλων διαστημάτων. Ακόμη, όμως, και σε μικρή κλίμακα του χρόνου είναι δυνατόν να παρατηρηθούν στο στερεό φλοιό της Γης δυο εντυπωσιακά όσο και τρομακτικά γεωλογικά φαινόμενα. Η έκρηξη ενός ηφαιστείου ή ένας σεισμός. Έτσι, η λάβα που βγαίνει από το εσωτερικό του ηφαιστείου μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλοιώσεις της γύρω περιοχής ή και η ίδια η έκρηξη του ηφαιστείου να οδηγήσει σε ισχυρό τράνταγμα της γήινης επιφάνειας, ενώ ο σεισμός (ανάλογα με το μέγεθός του) θέτει σε κίνηση μια πολύ μεγάλη περιοχή του γήινου φλοιού με όλα τα γνωστά επακόλουθα που μπορεί να έχει αυτό. Όπως το ηφαίστειο μας φέρνει στην επιφάνεια λάβα από το εσωτερικό της Γης, έτσι και ο σεισμός οφείλεται σε κάτι που συμβαίνει στο εσωτερικό της Γης. Κάπου δηλαδή στο εσωτερικό της Γης συμβαίνει μια διαταραχή, η οποία όταν φτάσει μέχρι τη γήινη επιφάνεια την οδηγεί σε ισχυρό τράνταγμα.

Και τα δυο αυτά φαινόμενα μας δείχνουν λοιπόν ότι, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην επιφάνεια, το εσωτερικό της Γης όχι μόνο δεν κοιμάται, αλλά μπορεί μέσα από κάποιες διεργασίες να οδηγήσει σε εκλύσεις εντυπωσιακά μεγάλων ποσών ενέργειας.Σκεφτείτε π.χ., ότι ένας σεισμός μπορεί να μετακινήσει κατά μερικά cm πέρα δώθε ή πάνω κάτω μια οροσειρά σαν αυτή της Πίνδου, ή και των Ιμαλαΐων ή να δημιουργήσει θαλάσσια κύματα ύψους πολλών δεκάδων μέτρων έτοιμα να εξαφανίσουν και ένα νησί. Φαίνεται λοιπόν ότι αξίζει τον κόπο ένα ταξίδι προς το κέντρο της Γης για να δούμε τι κρύβει στα σωθικά του ο πλανήτης μας. Η αχαλίνωτη φαντασία του Ιουλίου Βέρν έβαλε εκεί τέρατα τρομακτικά σε όγκο και σε σχήμα. Η επιστήμη θα μας ' πεί το δικό της λόγο.

Βέβαια η μελέτη του εσωτερικού της Γης δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον μόνο από την επιστημονική πλευρά. Υπάρχει τεράστιο ενδιαφέρον και από οικονομικής πλευράς, μιας και εκεί υπάρχει πετρέλαιο, πολύτιμα ορυκτά και μεταλλεύματα,

κ.λ.π. Πολλά, μάλιστα, στοιχεία για το εσωτερικό της Γης τα μάθαμε από τις έρευνες διαφόρων πετρελαϊκών εταιρειών.



Εάν η Γη ήταν μιά ομοιογενής σφαίρα, τότε οι τροχιές των σεισμικών κυμάτων θα ήταν ευθείες γραμμές. Αυτό όμως δεν ισχύει και έτσι οι τροχιές των σεισμικών κυμάτων υφίστανται και ανακλάσεις και διαθλάσεις.

Σχήμα 7

Κατ' αρχάς είναι προφανές ότι οι γνώσεις μας για το εσωτερικό της Γης δεν μπορούν να στηρίζονται σε άμεσες παρατηρήσεις. Το πιο βαθύ "πηγάδι" που έχουμε σκάψει πάει σε βάθος μόνο 12 km περίπου, καλύπτει δηλαδή ένα πολύ μικρό ποσοστό του ταξιδιού μας. Το πηγάδι αυτό έχει ανοιχτεί στο νησί Kola της Σοβιετικής Αρκτικής στην περιοχή Murmansk. Άρα θα στηριχτούμε σε έμμεσες παρατηρήσεις, δηλαδή σε πράγματα που παρατηρούμε στην επιφάνεια της Γης και έχουν την αιτία τους σε κάτι που συμβαίνει στο εσωτερικό της. Κι αυτά είναι, όπως είπαμε, τα ηφαίστεια και οι σεισμοί. Κυρίως οι σεισμοί, όσο καταστροφικά είναι τα αποτελέσματά τους, άλλο τόσο αποτελούν μια σημαντική και αναντικατάστατη πηγή πληροφοριών για το εσωτερικό του πλανήτη μας. Και να γιατί. Κάθε διαταραχή που συμβαίνει στο εσωτερικό ενός υλικού, διαδίδεται με κύματα σ' ολόκληρο το υλικό. Έτσι λοιπόν κάθε διαταραχή στο εσωτερικο της Γης διαδίδεται με κύματα (σεισμικά κύματα). Και είναι ακριβώς αυτά τα κύματα που όταν φτάσουν στην επιφάνεια της Γης οδηγούν στο ταρακούνημά της και επομένως σε σεισμό. Οι περίοδοι των διαφόρων ειδών κυμάτων που διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης μεταβάλλονται από 1 ώρα έως κλάσματα του δευτερολέπτου.

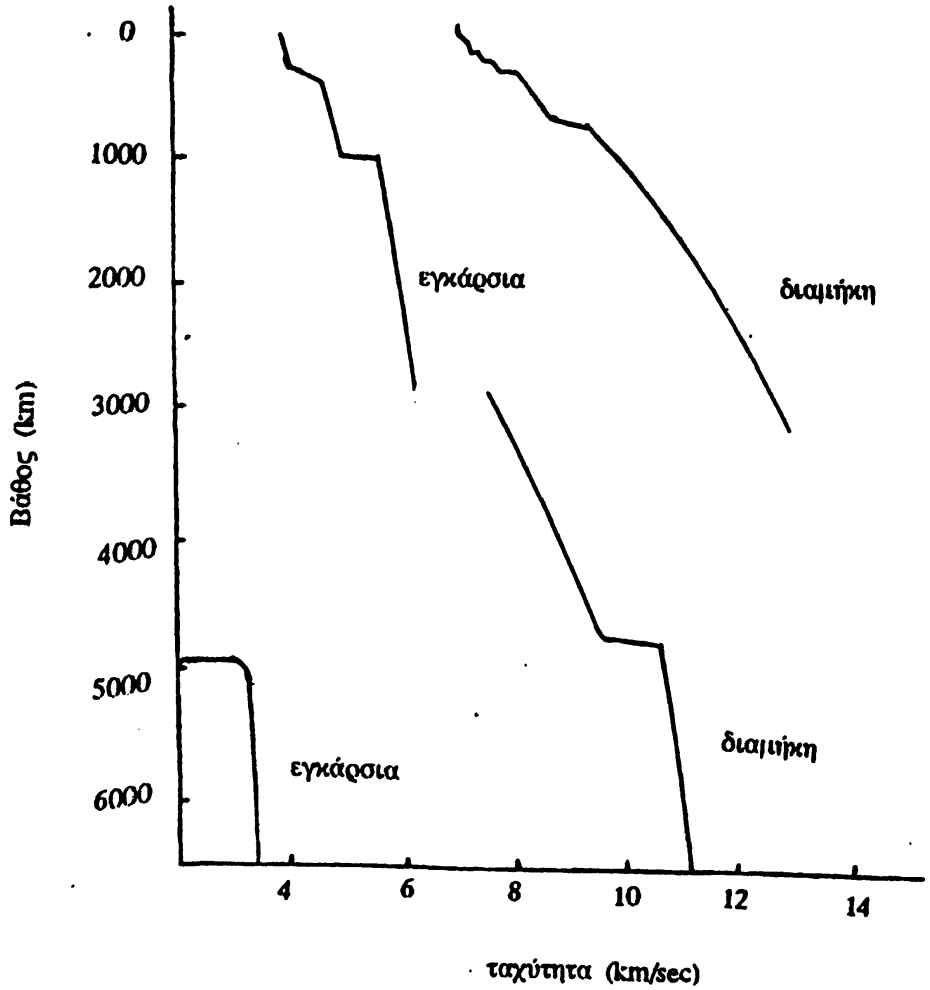
Η διασπορά των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης είναι γενικά ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο θα γνωρίσουμε με κάποιες λεπτομέρειες αργότερα. Εδώ εμείς απλά να σημειώσουμε ότι τα σεισμικά κύματα έχουν όλες τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των κυμάτων (μπορούν για παράδειγμα να ανακλαστούν ή να διαθλαστούν), και όπως όλα τα κύματα, να μας δώσουν κάποιες πληροφορίες για τις ιδιότητες του μέσου μέσα στο οποίο διαδόθηκαν. Η μελέτη τους λοιπόν οδηγεί στην αποκρυπτογράφηση πολλών μυστικών του εσωτερικού της Γης και παίζει τον ίδιο ρόλο που παίζει και μια ακτινογραφία του σώματός μας με ακτίνες Χ. Δεν θα ήταν υπερβολή αν λέγαμε ότι όπως τα ραδιοτηλεσκόπια αποκάλυψαν στο σύμπαν ουράνια σώματα που πριν ήταν αόρατα, έτσι και τα σεισμικά κύματα μας αποκάλυψαν λεπτομέρειες του εσωτερικού της Γης που θα παρέμεναν για πάντα άγνωστες χωρίς αυτά.

Οι πιο σημαντικές μελέτες του εσωτερικού της Γης έγιναν στη δεκαετία του '60, οπότε ο ψυχρός πόλεμος ήταν στο ζενίθ του. Τότε, τα υπουργεία Άμυνας των διαφόρων χωρών, με απώτερο σκοπό να εξακριβώσουν τις ακριβείς πυρηνικές δοκιμές που πραγματοποιούσε το αντίπαλο στρατόπεδο, έστησαν ένα μεγάλο δίκτυο σεισμογράφων που κατέγραφε τις δονήσεις της Γης μετά από κάθε τέτοια δοκιμή. Αυτές οι καταγραφές οι οποίες ήταν στην ουσία τεχνητά σεισμικά κύματα, έδωσαν ανεκτίμητες πληροφορίες όταν αφού τις μελέτησαν οι στρατιωτικοί τέθηκαν υπόψη και των γεωλόγων και γεωφυσικών.

Γενικά τα κύματα που διαδίδονται σ' ένα μέσο είναι δυο ειδών. Διαμήκη και εγκάρσια. Στα εγκάρσια κύματα η ταλάντωση γίνεται κάθετα στη διεύθυνση μετάδοσης και είναι κύματα που προκύπτουν όταν προσπαθούμε να αλλάξουμε το σχήμα του μέσου διάδοσης. Τέτοια κύματα επομένως δημιουργούνται μόνο στα στερεά, ενώ στα υγρά απουσιάζουν μιας και τα τελευταία δεν αντιδρούν καθόλου στην αλλαγή του σχήματός τους. Από την άλλη μεριά στα διαμήκη κύματα η ταλάντωση γίνεται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης και είναι κύματα που προκύπτουν όταν προσπαθούμε να αλλάξουμε τον όγκο του μέσου διάδοσης. Τέτοια κύματα επομένως δημιουργούνται και στα στερεά και στα υγρά. Τέλος όταν μια διαταραχή φτάσει στην επιφάνεια του μέσου διάδοσης δημιουργεί και τα λεγόμενα επιφανειακά κύματα.

Η ταχύτητα διάδοσης καθενός είδος κύματος είναι διαφορετική στο ίδιο μέσο, ενώ για το ίδιο κύμα η ταχύτητα διάδοσης είναι διαφορετική ανάλογα με την πίεση, τη θερμοκρασία, την πυκνότητα, την ελαστικότητα, την ακαμψία κ.λ.π. του μέσου διάδοσης. Αν ξέρουμε λοιπόν τη διαδρομή που ακολούθησε ένα κύμα, μπορούμε να έχουμε κάποια σημαντικά στοιχεία για τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης. Να σημειώσουμε ότι μικρές μεταβολές της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (μερικές μόνο μονάδες στα εκατό) σημαίνουν για τους γεωφυσικούς εντυπωσιακά μεγάλες διαφορές είτε στη δομή είτε στη θερμοκρασία των υλικών. Μερικές φορές, οι τάσεις που δρουν πάνω σ' ένα πέτρωμα στο εσωτερικό της Γης είναι τέτοιες ώστε να παρουσιάζει μια ανισοτροπία στη διάδοση

των σεισμικών κυμάτων. Η διάδοση δηλαδή των κυμάτων αυτών εξαρτιέται από την κατεύθυνση που έχουν τα κύματα. Στην περίπτωση αυτή από κύματα διαφορετικών διευθύνσεων μπορούμε να έχουμε μια τρισδιάστατη εικόνα του εσωτερικού της Γης, μια "σεισμική τομογραφία" δηλαδή. Είναι δε σημαντικό να σημειώσουμε ότι η σεισμογραφία έχει κάνει τόση πρόοδο ώστε σήμερα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων μέχρι και κοντά στο κέντρο της Γης με ακρίβεια καλύτερη από 1%.



Η μεταβολή της ταχύτητας των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων με το βάθος.

Σχήμα 8

Πριν από τη βοήθεια των σεισμικών φαινομένων, η αρχική προσπάθεια των επιστημόνων να κατανοήσουν τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό της Γης, έμοιαζε με τις προσπάθειες που καταβάλλει κάποιος να κατανοήσει τη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού από παρατηρήσεις που κάνει αποκλειστικά και μόνο στο ανθρώπινο δέρμα. Κι' αυτό γιατί μόνο ο στερεός φλοιός, που είναι το δέρμα του πλανήτη μας, ήταν προσιτός σε παρατήρηση. Όσο καλός δερματολόγος, όμως, κι αν είναι κάποιος, και όσο καλό εξοπλισμό κι αν διαθέτει είναι αδύνατον να φτάσει σε κάποια ολοκληρωμένα συμπεράσματα για το άγνωστο εσωτερικό, που εκτός των άλλων είναι και πολύπλοκο. Όπως η ιατρική και η βιολογία προόδευσαν με τη χρήση ανατομικών νυστεριών που άνοιγαν το σώμα και το έκαναν προσιτό στην παρατήρηση, κάτι τέτοιο χρειαζόντουσαν και οι γεωεπιστήμονες. Όμως, εδώ η χειρουργική επέμβαση γνώριζαν ευθύς εξαρχής ότι ήταν αδύνατον να γίνει. Ξαφνικά, από μια εποχή και πέρα, σε βοήθεια των δερματολόγων γεωεπιστημόνων ήρθαν οι ακτινολόγοι. Αυτοί μπορούσαν τώρα να δώσουν και κάποιες ακτινογραφίες του εσωτερικού της Γης, μέσα από τα σεισμογραφήμματά τους. Και μ' αυτές τις δυο ειδικότητες και μόνο μ' αυτές προσπαθούμε μέχρι σήμερα να κατανοήσουμε τις πολύπλοκες και σημαντικές λειτουργίες του γήινου οργανισμού. Δυστυχώς, σημαντική βοήθεια δεν μπορούμε να πάρουμε στο σημείο αυτό ούτε από άλλα μέλη του πλανητικού μας συστήματος.

Πράγματι, είπαμε στα προηγούμενα ότι η μελέτη της Γης έχει μιαν ιδιαιτερότητα μιας και είναι ο μοναδικός κατοικίσιμος πλανήτης που ξέρουμε. Όμως οι ιδιαιτερότητές της δεν σταματάνε στο σημείο αυτό, που έχει σχέση μόνο με τη βιόσφαιρα. Έτσι, εάν προσπαθήσουμε να συγκρίνουμε τον πλανήτη μας με τους άλλους γειτονικούς πλανήτες με τους οποίους θα περιμέναμε να έχει κάποιες ομοιότητες, γρήγορα διαπιστώνουμε ότι έχει, εντελώς απρόσμενα, μοναδικά γεωλογικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, έχει ένα πολύ λεπτό στερεό φλοιό, ακόμα και αν τον συγκρίνουμε με αυτόν της Σελήνης, με σύσταση τελείως διαφορετική απ' αυτή ολόκληρου του υπόλοιπου πλανήτη. Επίσης, κανένας από τους αδελφούς πλανήτες δεν έχει την έντονη τεκτονική δράση της Γης, σεισμική

και ηφαιστειακή. Το φαινόμενο λοιπόν της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών που θα το γνωρίσουμε παρακάτω φαίνεται ότι είναι, στα πλαίσια τουλάχιστον του δικού μας ηλιακού συστήματος, ταυτισμένο με τον πλανήτη μας.

Στοιχεία τα οποία μας ενδιαφέρουν να τα γνωρίζουμε καθώς πηγαίνουμε προς το κέντρο της Γης είναι η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας g. η πίεση P, η θερμοκρασία T και μερικές χαρακτηριστικές ιδιότητες των πετρωμάτων που υπάρχουν εκεί, όπως το μέτρο της ελαστικότητάς τους ή μέτρο Young, το μέτρο της ακαμψίας τους κ.λ.π. Οι ποσότητες αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό εκτός των άλλων της ταχύτητας των κυμάτων που διαδίδονται μέσα από τα πετρώματα αυτά, όπως είπαμε.

Για τον υπολογισμό του g τα πράγματα είναι σχετικά εύκολα. Η φυσική μας λέει ότι η τιμή της ποσότητας αυτής στο εσωτερικό ενός σφαιρικού ομογενούς σώματος ακτίνας R και σε βάθος h από την επιφάνεια του σώματος αυτού είναι ίση με

$$g_h = g_{\epsilon\pi} \frac{(R-h)^3}{R^3}$$

όπου $g_{\epsilon\pi}$ η τιμή του g στην επιφάνεια του σώματος. Βλέπουμε δηλαδή ότι είναι ίση με την επιτάχυνση στην επιφάνεια ενός σώματος που έχει την ίδια σύνθεση με το σώμα που εξετάζουμε και ακτίνα R-h. Βέβαια η Γη δεν είναι ούτε ακριβώς σφαιρικό σώμα, ούτε η σύνθεσή της είναι παντού η ίδια. Έτσι, η παραπάνω σχέση είναι σωστή μόνο σε μια πρώτη προσέγγιση.

Σε μια δεύτερη προσέγγιση αν $\bar{\rho}$ είναι η μέση πυκνότητα της Γης από βάθος h από την επιφάνεια έως και το κέντρο της, τότε έχουμε ότι η τιμή του g_h στο βάθος αυτό είναι

$$g_h = \frac{4}{3} \pi \bar{\rho} G(R-h)$$

όπου G η σταθερά της παγκόσμιας έλξης. Σε μα παραπέρα τέλος προσέγγιση πρέπει να λάβει κανένας υπόψη του τη μέση πυκνότητα των διαφόρων σφαιρικών φλοιών στους οποίους μπορεί να χωριστεί η Γη. Αποκλίσεις του g από την τιμή

που περιμένουμε μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες για παραπανήσια ή λιγότερη μάζα ή για μεταβολές της πυκνότητας στην αντίστοιχη περιοχή. Η μεταβολή επομένως του g είναι αντικείμενο προσεκτικής μελέτης.

Για να βρούμε τη μέση πυκνότητα στις διάφορες περιοχές του εσωτερικού της Γης έχουμε διάφορους τρόπους που ο ένας συμπληρώνει τον άλλο. Από την ολική μάζα της Γης, από τη ροπή αδράνειας γύρω από τον άξονα περιστροφής της και από τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Γνωρίζοντας τη μέση πυκνότητα θα πρέπει στη συνέχεια να ανακαλύψουμε τη χημική σύσταση της κάθε περιοχής, έτσι, βέβαια, που αυτή να είναι σε συμφωνία με αστρονομικές παρατηρήσεις για τη σύσταση άλλων πλανητών και μετεωριτών, ή μ' άλλα λόγια με τη σύσταση του αρχικού νέφους.

Σε σχέση με την πίεση, για λόγους που μας εξηγεί η υδροστατική, περιμένουμε να αυξάνει συνεχώς με το βάθος. Έτσι, λοιπόν, μιας και λόγω της βαρύτητας τα ανώτερα στρώματα πιέζουν τα κατώτερα, η πίεση αυξάνει συνεχώς καθώς πηγαίνουμε προς το κέντρο της Γης. Ακριβώς για τον ίδιο λόγο αυξάνει η πίεση καθώς κατεβαίνουμε την ατμόσφαιρα από ψηλά προς την επιφάνεια της Γης, ή βυθιζόμαστε στη θάλασσα. Για να υπολογίσουμε την πίεση που επικρατεί σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος στο εσωτερικό της Γης θα πρέπει να γνωρίζουμε την κατανομή της πυκνότητας των υλικών που βρίσκονται πάνω από το σημείο αυτό όπως μας διδάσκει η υδροστατική. Στο κέντρο της Γης η πίεση εκτιμάται ότι είναι το πολύ 3.5- 4×10^{12} dyn/cm^2 ή 3.5 εκατομμύρια ατμόσφαιρες. Η μεταβολή της πίεσης από την επιφάνεια έως το κέντρο της Γης ακολουθεί γενικά μια συνεχή καμπύλη συναρτήσει του βάθους.

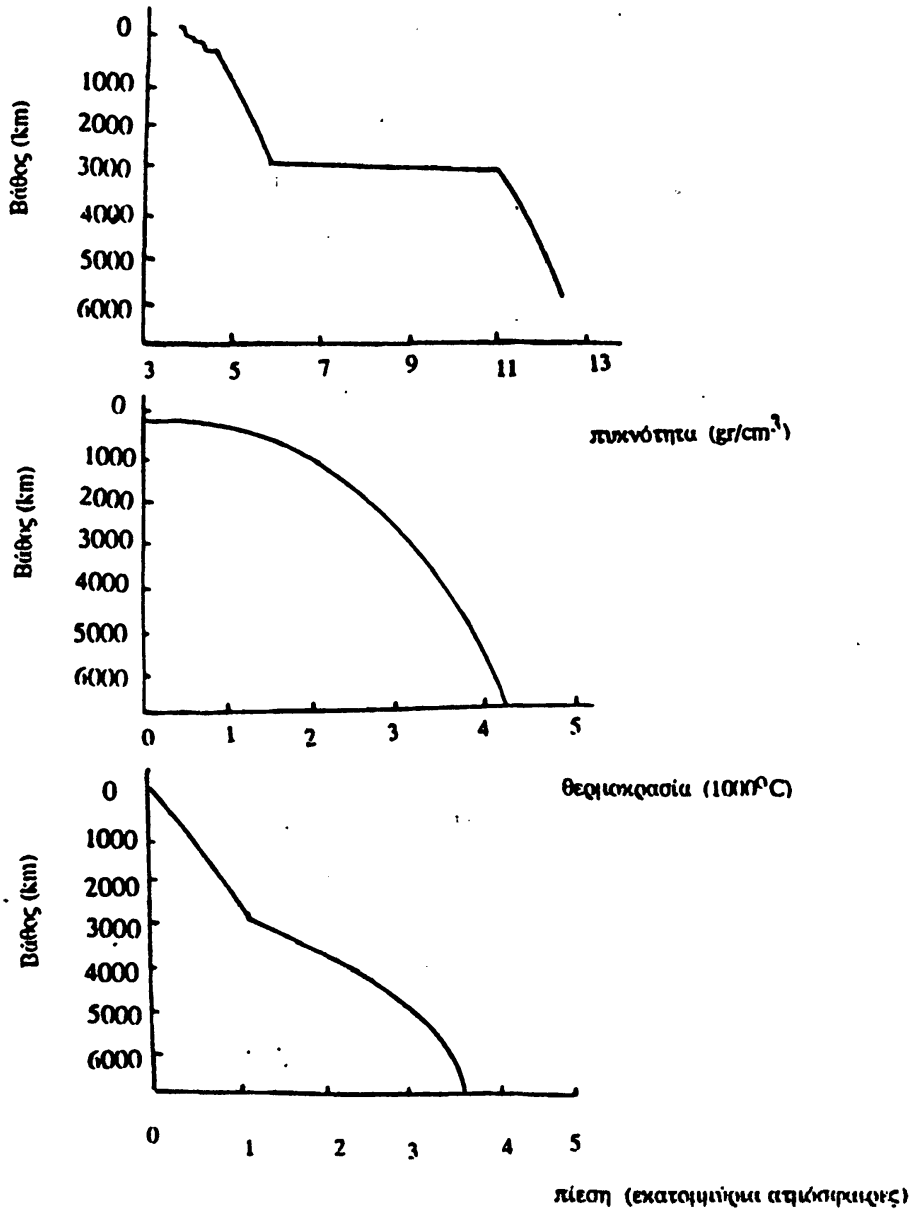
Για λόγους που θα αναλύσουμε πιο κάτω, περιμένουμε επίσης να έχουμε μιαν αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος. Η πολύ ζεστή λάβα από τα ηφαίστεια είναι άλλωστε ένας αδιάψευστος μάρτυρας του γεγονότος αυτού. Για τη μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος τα πράγματα όμως είναι πιο δύσκολα. Η μεταβολή αυτή διαφέρει αν είμαστε κάτω από ωκεανούς, από ηπείρους, σε ηφαιστειακές περιοχές κ.λ.π. Γενικά η γεωθερμική βαθμίδα είναι 1° - 5° C ανά 100 m για τα

εξωτερικά τμήματα του γήινου φλοιού. Όσο προχωράμε όμως προς τα κάτω η τιμή αυτή πέφτει σημαντικά, και στις περιοχές που είναι στο κέντρο της Γης γίνεται ίση με 0.8 ^{o}C ανά χιλιόμετρο. Εκτός από την αύξηση της πίεσης, σημαντική πηγή αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της Γης αποτελούν και οι διασπάσεις των ραδιενεργών στοιχείων που βρίσκονται εκεί, αλλά δυστυχώς δεν γνωρίζουμε την κατανομή των στοιχείων αυτών με σημαντική ακρίβεια.

Σίγουρα όμως η θερμοκρασία στο κέντρο της Γης θα πρέπει να είναι πολύ πιο κάτω από τη θερμοκρασία εκείνη στην οποία μπορούν να συντηρηθούν θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, μιας και δεν έχουμε δεδομένα για έκλυση θερμότητας από τέτοιες αντιδράσεις. Να σημειώσουμε ότι στην επιφάνεια του Ηλιου, στον οποίο όπως αναφέραμε παρατηρούνται τέτοιες αντιδράσεις, η θερμοκρασία είναι περίπου 5500 ^{o}C. Από διάφορους υπολογισμούς εκτιμάται ότι η θερμοκρασίαστο κέντρο της Γης πρέπει να είναι περίπου 4.000 με 5.000 ^{o}C. Βλέπουμε λοιπόν ότι καθώς θα ταξιδέψουμε προς το κέντρο της Γης θα συναντήσουμε και πολύ μεγάλες θερμοκρασίες και πολύ μεγάλες πιέσεις. Συνθήκες δηλαδή στις οποίες δεν είμαστε και τόσο πολύ συνηθισμένοι εδώ στην επιφάνεια.

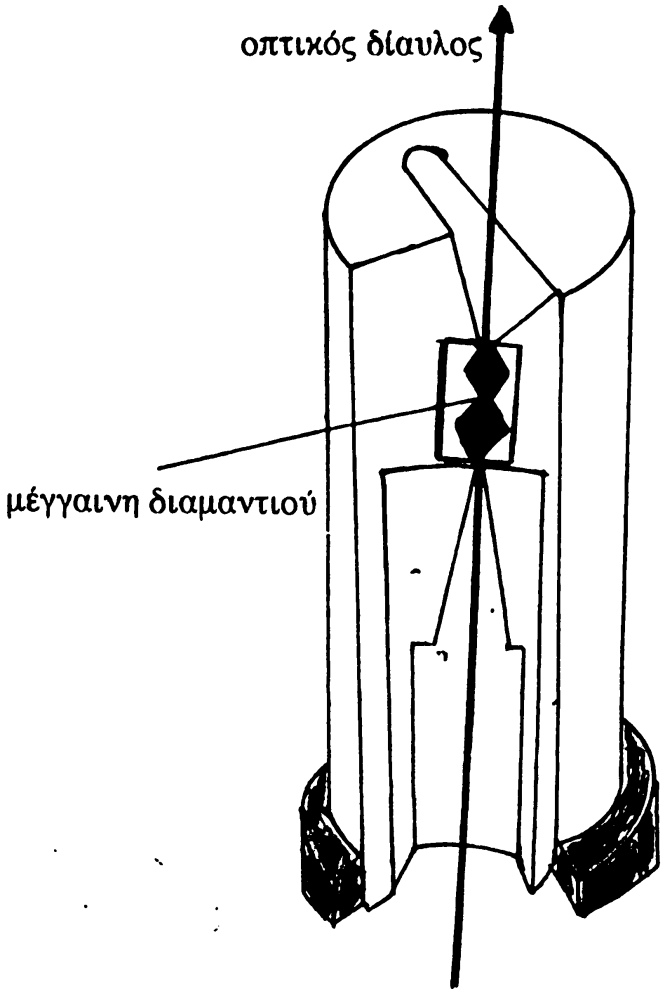
Είναι προφανές ότι οι ακραίες αυτές συνθήκες ήταν ένας ανασταλτικός παράγοντας στην εργαστηριακή αναπαραγωγή των όσων επικρατούν στο εσωτερικό της Γης, ώστε να έχουμε απευθείας πειραματικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά των διαφόρων υλικών στα μεγάλα βάθη. Πρόσφατα όμως βρέθηκε μια πολύ έξυπνη, απλή αλλά και συνάμα αποτελεσματική τεχνική, η οποία μας βοηθάει να εξασκήσουμε πολύ μεγάλες πιέσεις σε δείγματα υλικών που έχουν και μεγάλη θερμοκρασία. Ονομάζεται "μέγγαινη του διαμαντιού" και αποτελείται από δυο αιχμηρές άκρες εμός καλογυαλισμένου διαμαντιού, ανάμεσα στις οποίες τοποθετούνται τα δείγματα που θέλουμε να εξετάσουμε. Γυρίζοντας μια βίδα με το χέρι οι δυο άκρες του διαμαντιού πλησιάζουν και πιέζουν πάρα πολύ το δείγμα που είναι ανάμεσά τους. Έτσι, αν και η δύναμη που δημιουργεί την πίεση δεν είναι μεγάλη, εντούτοις η επιφάνεια πάνω στην οποία εφαρμόζεται είναι τόσο

μικρή, ώστε η πίεση αυτή να παίρνει πολύ μεγαλύτερες τιμές από οποιαδήποτε πίεση δημιουργεί ένα υδραυλικό πιεστήριο. Υπενθυμίζουμε ότι η πίεση P ορίζεται από τη σχέση $P = \frac{F}{S}$, όπου F η δύναμη που ασκείται σε μια επιφάνεια S.



Δείχνεται η μεταβολή της πυκνότητας, της θερμοκρασίας και της πίεσης με το βάθος, στο εσωτερικό του πλανήτη μας.

Σχήμα 9



Η μέγγαινη του διαμαντιού μπορεί να αναπαράγει με πολύ εύκολο τρόπο τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης. Οι μεγάλες πιέσεις πετυχαίνονται μικραίνοντας πολύ την επιφάνεια S πάνω στην οποίαν ασκείται μιά δύναμη, και οι υψηλές θερμοκρασίες με τη βοήθεια μιάς ακτίνας LASER.

Σχήμα 10

Εκμεταλευόμενοι τη διαφάνεια του διαμαντιού το υλικό θερμαίνεται επίσης με μια ακτίνα Laser που περνάει από το ένα διαμάντι, ενώ μια φωτογραφική μηχανή φωτογραφίζει συνεχώς το υπό παρατήρηση υλικό μέσα από το άλλο διαμάντι. Με τον τρόπο αυτό καταφέραμε αρχικά να οδηγήσουμε τα υλικά που εξετάζαμε σε πίεση 300.000 ατμοσφαιρών και θερμοκρασία 1500 ^{o}C. Οι αριθμοί

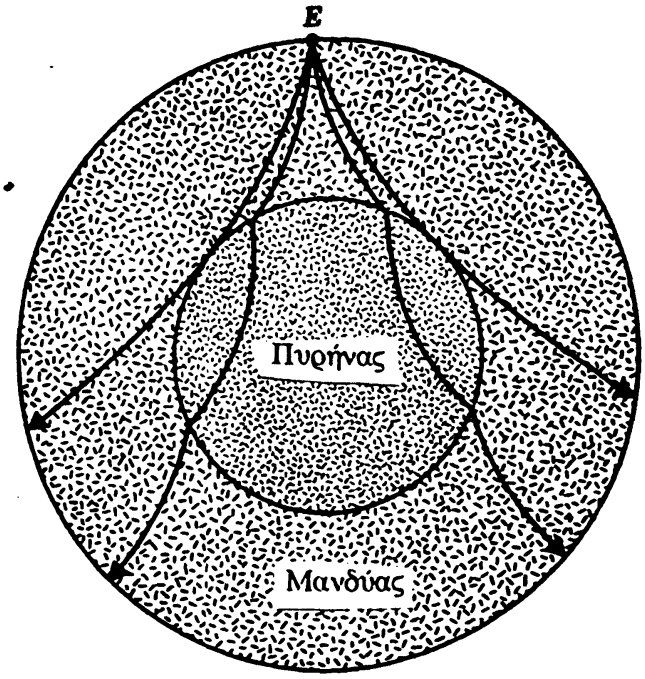
αυτοί μας δείχνουν ότι αρχικά είμασταν ακόμη μακριά από την πλήρη αναπαραγωγή των συνθηκών που επικρατούν πολύ βαθιά στη Γη. Σήμερα βελτιωμένα τέτοια όργανα μπορούν να μας δώσουν πιέσεις που υπερβαίνουν τις αντίστοιχες στο κέντρο της Γης, και να θερμάνουν το δείγμα μέχρι και 6.000 ^{o}C. Σε μερικές περιπτώσεις δε χρησιμοποιούνται και διάταξεις με πολλά τέτοια όργανα οπότε το δείγμα που παρατηρούμε μπορεί να έχει μεγαλύτερο όγκο. Στην ουσία η μέγγαινη του διαμαντιού μας φέρνει το εσωτερικό της Γης στην επιφάνεια. Αναλύοντας ελαχιστότατα δείγματα υλικών κάτω από την πίεση της μέγγαινης του διαμαντιού μπορούμε να μελετήσουμε τις αλλαγές που υφίστανται, και κυρίως τις αλλαγές φάσης τους, που συνίστανται στην επαναδιάταξη κάτω από μεγάλες πιέσεις των ατόμων των μορίων τους. Όπως θα δούμε τέτοιες αλλαγές φάσεις παρατηρούνται σε ένα σημαντικό τμήμα του εσωτερικού της Γης.

Όσον αφορά στη χημική σύσταση του εσωτερικού της Γης, κάποιες άμεσες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν στην ηφαιστειακή λάβα. Όμως, η λάβα έρχεται από σχετικά μικρά βάθη, και έτσι θα πρέπει να μαντέψουμε ποια στοιχεία υπάρχουν στο εσωτερικό της Γης έτσι ώστε να μας δίνουν σωστή πυκνότητα για τα διάφορα μέρη του. Βέβαια, τα στοιχεία αυτά η Γη τα πήρε από το αρχικό νέφος το οποίο σχημάτισε το πλανητικό μας σύστημα. Γι' αυτό αξιόλογη πηγή πληροφοριών για τη σύστασή της είναι και τα κομμάτια των μετεωριτών που φτάνουν μέχρι την επιφάνεια της Γης, κομμάτια από άλλους πλανήτες και κυρίως από τους αστεροειδείς. Η σύστασή τους μας δίνει κάποιες πρώτες ενδείξεις για το ποια θα πρέπει να είναι η σύσταση και του δικού μας πλανήτη, μιας και όλα τα μέλη του πλανητικού μας συστήματος έχουν όπως είπαμε κοινή μητέρα. Τέλος, η φυσική διαθέτει σήμερα αρκετά θεωρητικά μοντέλα που της επιτρέπουν να υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τη μεταβολή με το βάθος κάποιων στοιχείων που αναφέρονται τόσο στη θερμοδυναμική όσο και στη φυσικοχημική συμπεριφορά των υλικών του εσωτερικού της Γης. Περισσότερα, όμως, για τη χημική σύσταση του εσωτερικού της Γης θα πούμε παρακάτω.

Ας έρθουμε τώρα να δούμε τις πρώτες πληροφορίες που μας δίνουν τα σεισμικά κύματα για τα πλάχνα του πλανήτη μας. Η πρώτη παρατήρηση που αφορά στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης μας δείχνει ότι γενικά η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος αυξάνει όσο αυξάνει και η απόσταση από την επιφάνεια της Γης. Εάν το μέσο διάδοσης ήταν παντού το ίδιο, τότε περιμένουμε αυτή η αύξηση να είναι συνεχής. Διαφορετικά, καθώς περνάμε από ένα μέσο διάδοσης σε ένα άλλο, η ταχύτητα θα παρουσιάζει μιαν απότομη μεταβολή, ή μιαν ασυνέχεια όπως λέμε. Η πρώτη τέτοια ασυνέχεια καταγράφτηκε από το Γιουγκοσλάβο Α. Mohorovicic το 1909, ο οποίος εξετάζοντας τους σεισμούς της Βαλκανικής διαπίστωσε ότι σε βάθος περίπου 40 km η ταχύτητα των μεν εγκάρσιων κυμάτων αυξάνει απότομα από 4.3 σε 4.7 km/sec των δε διαμήκων από 6.8 σε 8.2 km/sec. Αυτό σήμαινε αμέσως ότι σε αυτό το βάθος η σύσταση του εσωτερικού της Γης άλλαξε σημαντικά. Η πρώτη αυτή ασυνέχεια ονομάστηκε "ασυνέχεια Mohorovicic" ή Moho.Στη συνέχεια έχουμε και πάλι μια συνεχή αύξηση της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων, μέχρι περίπου του βάθους των 3.000 km. Στο σημείο αυτό έχουμε μιαν απότομη ελάττωση της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων από 13.7 km/sec σε 8.1 km/sec ενώ τα εγκάρσια κύματα εξαφανίζονται τελείως. Σημάδι ότι το μέσο διάδοσης έχει τα χαρακτηριστικά της υγρής κατάστασης. Στο νέο αυτό μέσο έχουμε στη συνέχεια μια συνεχή αύξηση της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων, μέχρις ότου αυτή φτάσει στο κέντρο της Γης τα 11.4 km/sec. Η δεύτερη αυτή ασυνέχεια ονομάστηκε "ασυνέχεια Gutenberg" προς τιμή του πρώτου επιστήμονα που την κατέγραψε. Βλέπουμε λοιπόν ότι το εσωτερικό της Γης σε μια πρώτη προσέγγιση μπορει να χωριστεί σε τρία μέση, τα οποία και θα μελετήσουμε με περισσότερες λεπτομέρειες στα επόμενα.

Τα τρία αυτά μέρη ονομάζονται από έξω προς τα μέσα: Στερεός Φλοιός, Μανδύας και Πυρήνας. Την εξέταση του εσωτερικού της Γης όμως θα την ξεκινήσουμε από μέσα προς τα έξω. Ο λόγος είναι ότι οι τρεις περιοχές του εσωτερικού της Γης δεν πρέπει να θεωρηθούν σαν απομονωμένες μεταξύ τους, που δεν έχουν καμιά ή πολύ μικρή αλληλεπίδραση. Αντίθετα, η μεταξύ τους

αλληλεπίδραση είναι πολύ σημαντική, και μάλιστα ξεκινάει από τα μέσα προς τα έξω. Γι' αυτό και εμείς θα ακολουθήσουμε αυτή την πορεία.



Το εσωτερικό του πλανήτη μας, έτσι όπως αποκαλύπτεται από τη μελέτη των σεισμικών κυμάτων.

Σχήμα 11

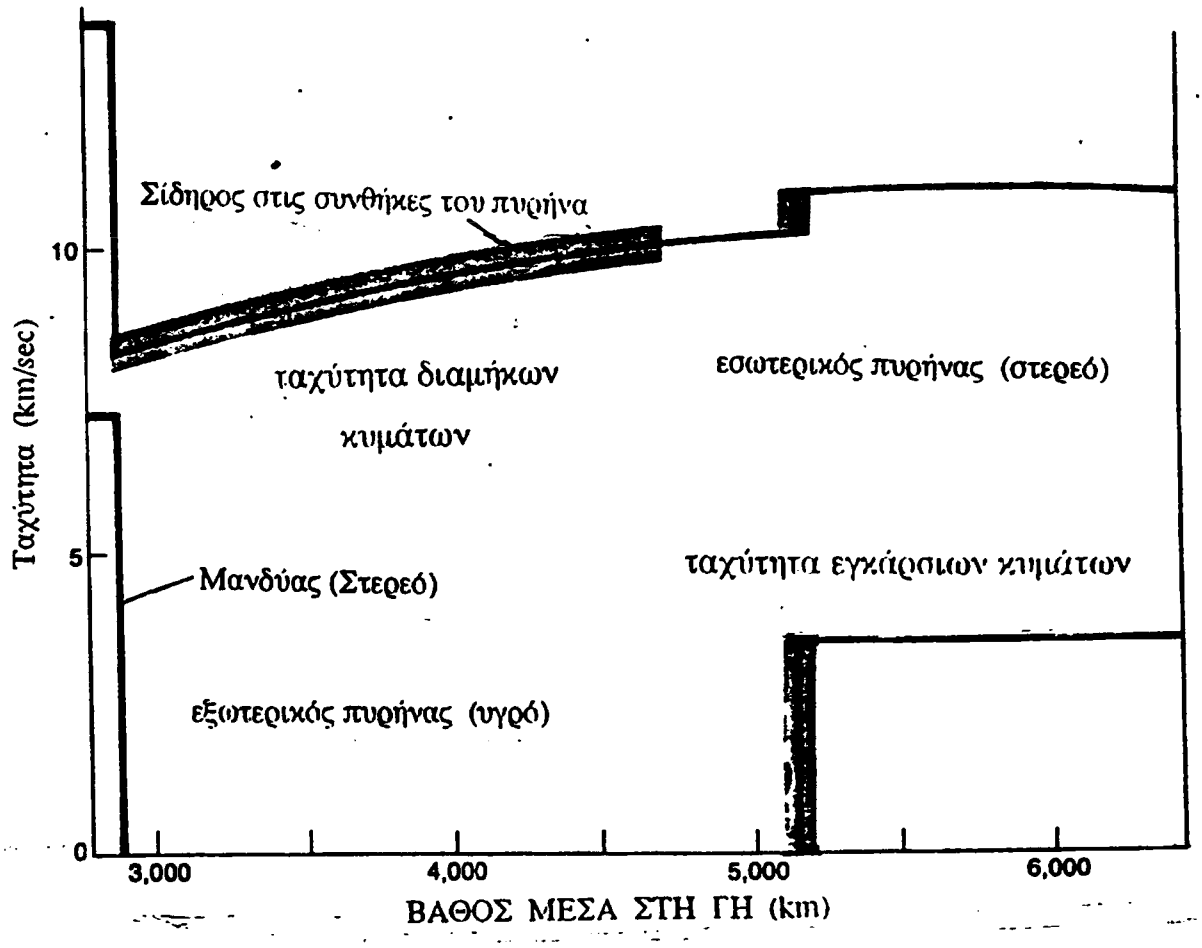
2.2. Ο Πυρήνας

2.2.1. Ιδιότητες και σύσταση

Ο πυρήνας της Γης είναι το εσώτατο τμήμα της και εκτείνεται κάτω από την ασυνέχεια Gutenberg δηλαδή εκτείνεται από βάθος 2.900 km έως τα 6.370 km. Στην ουσία πρόκειται για μια σφαίρα ακτίνας περίπου 3.450 km, δηλαδή λίγο μεγαλύτερης από το μισό της γήινης ακτίνας. Ο όγκος όμως του πυρήνα είναι μόνο το 1/8 του γήινου όγκου. Όπως θα δούμε ότι συμβαίνει και στα άλλα δυο τμήματα του εσωτερικού της Γης, έτσι και εδώ σε βάθος 5.000 km περίπου διαπιστώνεται μια μικρή ασυνέχεια που διαιρεί τον πυρήνα σε δυο μέρη, τον εξωτερικό και τον εσωτερικό πυρήνα. Ο εσωτερικός πυρήνας έχει επομένως ακτίνα 1200 km είναι δηλαδή κατά τι μεγαλύτερος από τη Σελήνη. Η πυκνότητα στην αρχή του εξωτερικού πυρήνα παρουσιάζει μια πολύ μεγάλη αύξηση, είναι περίπου 9.5 gr/cm^3, για να φτάσει στη διαχωριστική επιφάνεια του εξωτερικού και εσωτερικού πυρήνα τα 11.5 gr/cm^3. Τέλος στον εσωτερικό πυρήνα η πυκνότητα είναι 14.5 - 18 gr/cm^3. Η αδυναμία παρατήρησης εγκάρσιων κυμάτων στον εξωτερικό πυρήνα σημαίνει ότι το υλικό του βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση, ενώ αντίθετα ο εσωτερικός πυρήνας είναι σε στερεά κατάσταση.

Ο εσωτερικός πυρήνας αντιπροσωπεύει το 1.7% της μάζας της Γης, ενώ ο εξωτερικός το 30.8%. Και οι δυο μαζί επομένως αντιπροσωπεύουν το 32.5% της μάζας της, δηλαδή περίπου το 1/3. Ανάμεσα στους δυο πυρήνες θα πρέπει να υπάρχει μια "μεταβατική ζώνη" όπου κανένας συναντά εν μέρει υγρό και εν μέρει στερεό μίγμα υλικών. Πρόσφατα, υπάρχουν ενδείξεις από σεισμικά κύματα για την ύπαρξη μιας "πολτώδους" ζώνης στις πρώτες εκατοντάδες χιλιόμετρα στην αρχή του εσωτερικού πυρήνα. Βέβαια οι αναλύσεις, δοσμένου του μεγάλου βάθους, περιέχουν αρκετή αβεβαιότητα και τίποτα δεν έχει ακόμη εξακριβωθεί με σιγουριά. Φαίνεται όμως ότι ανάμεσα στις δυο περιοχές του πυρήνα υπάρχει μια

περιοχή ανώμαλης συμπεριφοράς των σεισμικών κυμάτων, στην οποία υπάρχει μίγμα κρυστάλλων και υγρού.



Οι μεταβολές στην ταχύτητα των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων στον Πυρήνα.

Σχήμα 12

Η πίεση στον πυρήνα κυμαίνεται από 1.3 εκατομμύρια ατμόσφαιρες έως 3.5 εκατομμύρια ατμόσφαιρες. Η θερμοκρασία αντίστοιχα κυμαίνεται από 4.000 ^{o}C

έως 5.000 ^{o}C. Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος (θερμοβαθμίδα) είναι σχετικά μικρή στον πυρήνα, και συγκεκριμένα είναι 0.8 ^{o}C/km.

Ως προς τη χημική σύσταση του πυρήνα υπάρχει αρκετή αβεβαιότητα. Πριν συνεχίσουμε να δούμε τα σχετικά με το πρόβλημα αυτό να σημειώσουμε ότι στον πυρήνα βρίσκεται ο μηχανισμός που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο της Γης. Άρα ο πυρήνας θα πρέπει να έχει υλικά που είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Το μοντέλο που συγκεντρώνει τις περισσότερες πιθανότητες να είναι αληθινό πρεσβεύει ότι το κύριο συστατικό του πυρήνα είναι ο σίδηρος. Εκτός από το ότι αυτό συμφωνεί με τη γενική εικόνα που μας δίνουν τα σεισμικά κύματα, υπάρχει και ένας άλλος λόγος. Συγκεκριμένα δεν υπάρχουν πουθενά ενδείξεις ότι άλλο υλικό (με τις ιδιότητες που χρειαζόμαστε για τον πυρήνα) υπάρχει σε τόση αφθονία στο σύμπαν, όσο ο σίδηρος. Έτσι λοιπόν η Γη, από άποψη χημικής σύστασης φαίνεται να χωρίζεται σε δυο περιοχές. Στη σιδηροκρατούμενη περιοχή του πυρήνα και στην πυριτοκρατούμενη περιοχή όπως θα δούμε του μανδύα και του στερεού φλοιού. Βέβαια πολλοί γεωλόγοι έχουν ισχυρά επιχειρήματα υποστηρίζοντας ότι ίσως ο πυρήνας έχει και άλλα μέταλλα (όπως νικέλιο) εκτός του σιδήρου. Άλλοι υποστηρίζουν επίσης ότι ο πυρήνας περιέχει πολύ οξυγόνο και θείο. Σιδηρούχα οξείδια του θείου θα πρέπει να σημειώσουμε ότι βρίσκονται και σε πολλούς μετεωρίτες, η σύνθεση των οποίων μας βοηθάει στα συμπεράσματά μας σε σχέση με τη σύσταση των πλανητών. Από την άλλη μεριά τα οξείδια του σιδήρου σε μεγάλες πιέσεις γίνονται μεταλλικά, αντίθετα δηλαδή με ότι συμβαίνει στις συνηθισμένες χαμηλές πιέσεις.

Σίγουρα, πάντως, από μετρήσεις της ροπής αδράνειας της Γης ο πυρήνας δεν μπορεί να περιέχει 100% καθαρό σίδηρο, αλλά κατά 10% και κάποια ελαφρότερα στοιχεία. Σήμερα, πιθανότερα τέτοια στοιχεία πιστεύουμε ότι είναι το οξυγόνο, το θείο, ο άνθρακας, το Ηλιο και το υδρογόνο. Σα συγκριτικό στοιχείο να πούμε ότι ο Ερμής είναι ο πλανήτης με τον πιο καθαρό σε περιεκτικότητα σιδήρου πυρήνα, γι' αυτό άλλωστε έχει και μια μεγάλη μέση πυκνότητα.

Είδαμε βέβαια στην αρχή ότι τα δυο μέρη του πυρήνα δεν βρίσκονται στην ίδια φυσική κατάσταση. Έτσι, ο μεν εξωτερικός πυρήνας συμπεριφέρεται σαν ρευστό, ο δε εσωτερικός σαν στερεό. Αυτό μας υποδεικνύει ότι είναι πολύ πιθανόν τα δυο αυτά μέρη να μη βρίσκονται σε χημική ισορροπία, δηλαδή οι χημικές τους συνθέσεις να είναι αρκετά διαφορετικές. Οι γεωλόγοι υποθέτουν ότι ο εσωτερικός πυρήνας σχηματίστηκε από κρυσταλλοποιημένο υγρό του εξωτερικού πυρήνα. Για παράδειγμα, ο εσωτερικός πυρήνας θα μπορούσε να είναι καθαρός σίδηρος, ο οποίος έχει κρυσταλλοποιηθεί από το σίδηρο που υπάρχει στο υγρό κράμα του εξωτερικού πυρήνα.

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, η θερμοβαθμίδα στον πυρήνα είναι σχετικά μικρή, μόλις 0.8 ^{o} C/km. Ας προσπαθήσουμε τώρα να εφαρμόσουμε το νόμο της θερμικής αγωγιμότητας (νόμος του Fourier) στον πυρήνα. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, η θερμική ενέργεια ΔQ που περνά στη μονάδα της επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου μέσα από ένα υλικό που ενώνει δυο περιοχές με διαφορετική θερμοκρασία ΔT δίνεται από τη σχέση

$$\Delta Q = \lambda \Delta T$$

όπου λ η θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Ας θεωρήσουμε δυο περιοχές που απέχουν μεταξύ τους κατά 1 km. Τότε ΔT = 0.8 ^{o}C. Από εργαστηριακά πειράματα εκτιμιέται ότι η θερμική αγωγιμότητα των υλικών του πυρήνα είναι

$$\lambda = 60 \text{ με } 110 \quad \text{Watts/}^{o}\text{C m}$$

οπότε η παραπάνω σχέση μας δίνει

$$\Delta Q = 70 \text{ mWatts/m}^2 \pm 25 \text{ mWatts/m}^2$$

Είναι εντυπωσιακό ότι η τιμή αυτή για τη θερμική ροή από τον πυρήνα είναι πολύ κοντά στην τιμή που παίρνουμε για τη μέση θερμική ροή στην επιφάνεια της Γης. Άρα είναι πολύ πιθανόν ότι η ροή της θερμικής ενέργειας στον πυρήνα όχι μόνο δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο της Γης, αλλά επηρεάζει σημαντικά τις θερμικές διαδικασίες που όπως θα δούμε συντελούνται στον υπερκείμενο μανδύα, οι τεκτονικές κινήσεις του οποίου επηρεάζουν με τη σειρά τους τα όσα σημαντικά συμβαίνουν στον εξωτερικό φλοιό της Γης. Με άλλα λόγια ο πυρήνας φαίνεται να

είναι η φωτιά που ζεσταίνει το εσωτερικό της Γης και δημιουργεί όλες τις θερμικές κινήσεις που παρατηρούνται σ' αυτό. Αυτό μας δείχνει με τον καλύτερο τρόπο την ισχυρή αλληλεπίδραση των τριών περιοχών του εσωτερικού της Γης.

Με ποιον τρόπο οδηγηθήκαμε στο σχηματισμό του πυρήνα και στο ξεχώρισμά του από τα υπόλοιπα μέρη του εσωτερικού της γης; Δυο μοντέλα υπάρχουν που απαντούν στο παραπάνω ερώτημα. Σύμφωνα με το πρώτο, η Γη σχηματίστηκε από τη συστολή αερίων και σκόνης σαν ένα ενιαίο σύνολο αρχικά. Με την πάροδο του χρόνου όμως χωρίστηκε σε δυο διαφορετικές περιοχές, στο σιδηρούχο εσωτερικό τμήμα, τον πυρήνα δηλαδή, και το πυριτιούχο εξωτερικό τμήμα. Η διαδικασία που είναι υπεύθυνη για τον παραπάνω χωρισμό είναι η ίδια μ' αυτή που ξεχωρίζει δυο υλικά διαφορετικής πυκνότητας (π.χ. νερό και λάδι) μέσα στο πεδίο βαρύτητας, όσο κι αν τα έχουμε αρχικά αναμίξει. Καθώς ο βαρύς σίδηρος ή οι σιδηρουχες ενώσεις κινούνται προς το κέντρο και αρχίζει να σχηματίζεται ο πυρήνας απελευθερώνεται ένα σημαντικό ποσό βαρυτικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα και οδηγεί στη συνέχεια σε τήξη πολλά υλικά. Παγιδεύεται δε στο εσωτερικό της Γης (μιας και όπως θα δούμε ο πυρήνας καλύπτεται από κακούς αγωγούς της θερμότητας) και ίσως υπάρχουν ακόμη και σήμερα εκεί παγιδευμένα μεγάλα ποσά απ' αυτή την πρωταρχική θερμότητα. Βέβαια και άλλοι παράγοντες όπως είδαμε (ραδιενέργεια, πτώση μετεωριτών) αύξησαν παραπέρα τη θερμότητα που έδωσε η παραπάνω διεργασία.

Σύμφωνα με το δεύτερο μοντέλο ο πυρήνας σχηματίστηκε πρώτος από τα βαριά υλικά του πρωταρχικού αέριου και της σκόνης. Μετά το σχηματισμό αυτό άλλα πιο ελαφρά συστατικά άρχισαν να έλκονται από το βαρυτικό πεδίο του πυρήνα και να σχηματίζουν τα τμήματα της Γης που περιβάλλουν τον πυρήνα. Έτσι λοιπόν ο σιδηρούχος πυρήνας σχηματίστηκε πρώτος από σίδηρο και σιδηρούχες ενώσεις που έφτασαν πρώτες στο κέντρο του αρχικού αέριου και της σκόνης, και το πυρίτιο και οι πυριτιούχες ενώσεις ακολούθησαν. Το μοντέλο αυτό δεν μας δίνει πάντως μεγάλη παραγωγή θερμικής ενέργειας μιας και όταν σχηματίστηκε ο πυρήνας (που κύρια παρήγαγε την ενέργεια αυτή) δεν είχε

καλυφθεί από μονωτικά υλικά. Έτσι η πιο πολύ θερμική ενέργεια πρόφτασε και ακτινοβολήθηκε πίσω στο διάστημα. Αυτό είναι λοιπόν ένα σοβαρό μειονέκτημα του μοντέλου αυτού.

Ένα ενδιάμεσο μοντέλο που κρατά τα πλεονεκτήματα του πρώτου και παίρνει στοιχεία από το δεύτερο είναι το εξής. Ο πυρήνας σχηματίστηκε πράγματι αρκετά πριν η Γη αποκτήσει την τελική της μορφή, καθώς ο σίδηρος βυθίστηκε βαθιά στο κέντρο του αρχικού αέριου και ξεχώρισε από το πυρίτιο που τον κάλυψε και έδρασε σαν μονωτικό. Αυτή η πρωτογή άρχισε στη συνέχεια να αυξάνει και σε όγκο και σε μάζα, από υλικά που τράβηξε το βαρυτικό της πεδίο (ακόμη και πρωτοπλανήτες) και περιείχαν και σίδηρο και πυρίτιο. Η πτώση νέων υλικών στην πρωτογή δημιούργησε θερμότητα που προστέθηκε στην ενέργεια που ήδη υπήρχε από το χωρισμό του σιδήρου από το πυρίτιο. Έτσι έχουμε μια διαρκή τήξη των διαφόρων υλικών και ένα παραπέρα ξεχώρισμα του σιδήρου και του πυριτίου που υπήρχαν στα υλικά της πτώσης. Ο σίδηρος οδεύει και πάλι προς το σχηματισμένο σιδηρούχο πυρήνα, ενώ το πυρίτιο μένει στα εξωτερικά στρώματα. Βλέπουμε λοιπόν ότι στο μικτό αυτό μοντέλο ο σχηματισμός του πυρήνα και των εξωτερικών τμημάτων της Γης είναι μια συνεχής διαδικασία που μπορεί να χωριστεί σε δυο φάσεις.

2.2.2. Το μαγνητικό πεδίο

Το αυτοσυντηρούμενο δυναμό

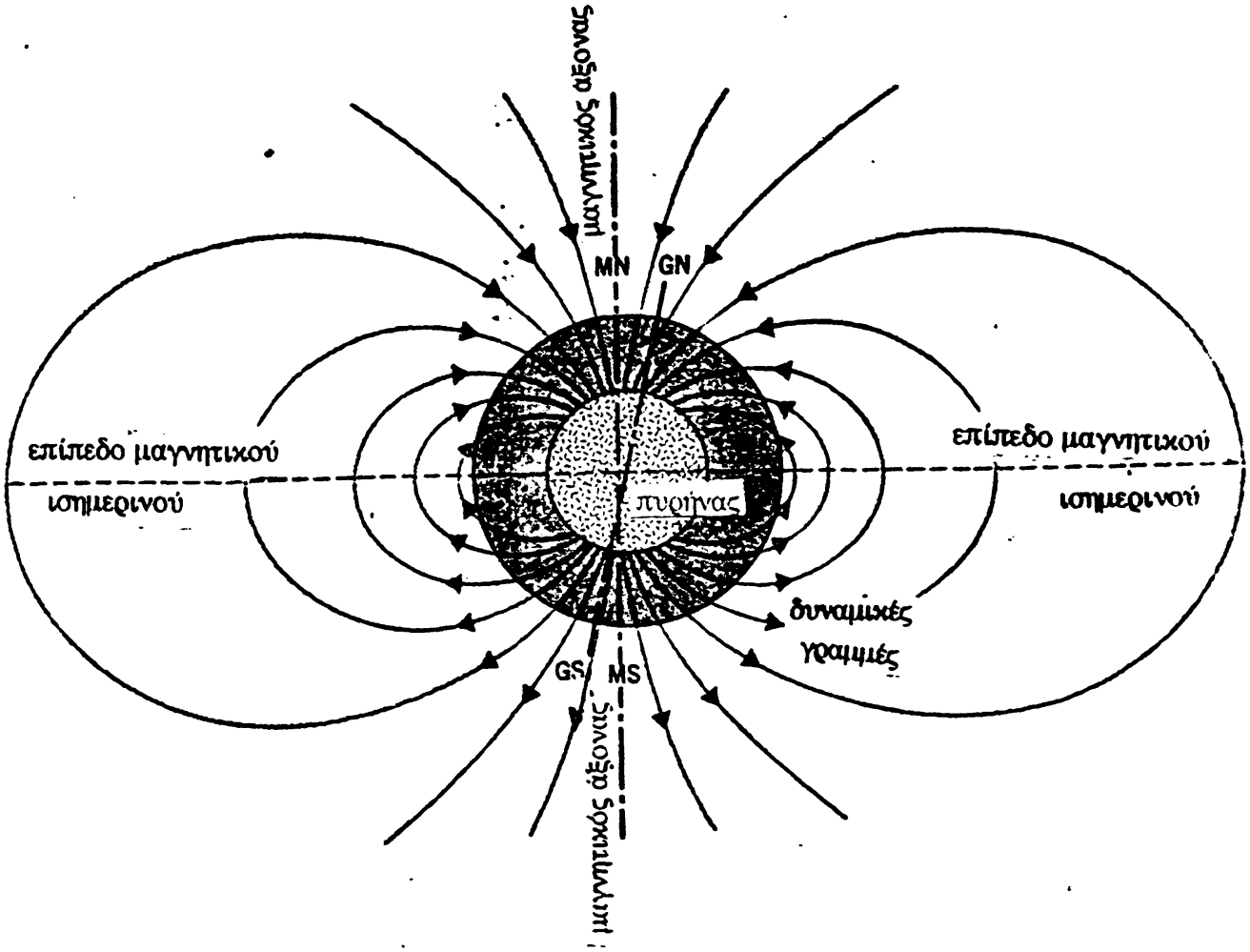
Ας έλθουμε τώρα να συζητήσουμε τα σχετικά με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Όπως είπαμε παραπάνω ο μηχανισμός που παράγει το πεδίο αυτό βρίσκεται στον πυρήνα. Πριν, όμως, μπούμε σε κάποιες λεπτομέρειες θα θέλαμε να προετοιμάσουμε τον αναγνώστη λέγοντας ότι το 1905 ο A. Einstein χαρακτήρισε το πρόβλημα του γεωμαγνητικού πεδίου σαν ένα από τα μεγαλύτερα άλυτα

προβλήματα της φυσικής. Ενενήντα χρόνια μετά, το πρόβλημα αυτό εξακολουθεί να είναι άλυτο, και πολλές από τις λεπτομέρειές του ελάχιστα κατανοητές.

Το ότι ο πλανήτης μας δρα σαν ένας μεγάλος μαγνήτης είναι γνωστό σε όλους μας, με τη βοήθεια της μαγνητικής πυξίδας, και ήδη αποτελούσε αντικείμενο επιστημονικής μελέτης από το 1600 και μετά, μετά τις πρωτοποριακές εργασίες του Άγγλου φυσικού W. Gilbert. Θα μπορούσαν οι μαγνητικές ιδιότητες του πλανήτη μας να αποδοθούν στη μόνιμη μαγνήτιση κάποιων ορυκτών; Όχι, γιατί οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του πλανήτη μας είναι αρκετά υψηλές, ώστε ένα μαγνητικό ορυκτό να καταφέρει να διατηρήσει τη μαγνήτισή του, και παραπέρα τα οποιαδήποτε μαγνητικά ορυκτά δεν μπορούν να κινηθούν στο εσωτερικό της Γης τόσο γρήγορα όσο απαιτούν κάποιες αλλαγές του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, λοιπόν, έγινε ευθύς εξ αρχής προφανές ότι οι μαγνητικές ιδιότητες του πλανήτη μας έπρεπε να αναζητηθούν στην κίνηση ή σε κινήσεις ηλεκτρικά φορτισμένων σωματίων στο εσωτερικό του . Η ιδιότητα ενός κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου να παράγει γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο είναι, βέβαια, αρκετά γνωστή από τον ηλεκτρομαγνητισμό. Παραμένει, όμως, ένα μεγάλο πρόβλημα η ακριβής ανακάλυψη και της κίνησης των ηλεκτρικών φορτίων αλλά και η αιτία που δημιουργεί την κίνηση αυτή.

Ο καλύτερος τρόπος να ανακαλύψει τις ιδιότητες του μαγνητικού πεδίου σε μια πρώτη προσπάθεια είναι να χρησιμοποιήσει κανείς μια κοινή μαγνητική πυξίδα. Διαπιστώνει τότε ότι η Γη μοιάζει με ένα γιγάντιο μαγνήτη, του οποίου οι δυο πόλοι βρίσκονται κοντά στους αντίστοιχους γεωγραφικούς πόλους. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στους πόλους το πεδίο έχει τη μεγαλύτερη ένταση. Και εκεί, όμως, η τιμή του πεδίου είναι μόλις 0.3 Gauss, δηλαδή αρκετές εκατοντάδες φορές πιο κάτω από το μαγνητικό πεδίο ενός κοινού μαγνήτη που πολλές φορές χρησιμοποιείται σαν παιχνίδι. Με βάση τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού, ένα υποψήφιο ηλεκτρικό ρεύμα που θα μπορούσε να παράγει τις παραπάνω μαγνητικές ιδιότητες θα ήταν ένα ρεύμα παράλληλο στον Ισημερινό. Όμως, δυστυχώς, η κατάσταση δεν είναι τόσο εύκολη. Και αυτό, γιατί ευθύς εξ αρχής

διαπιστώνουμε ότι το γεωμαγνητικό πεδίο δεν είναι απλό διπολικό. Έτσι, το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι κατά 90% απλό και προέρχεται από έναν διπολικό μαγνήτη, και κατά 10% είναι πολύπλοκο πολυπολικό.



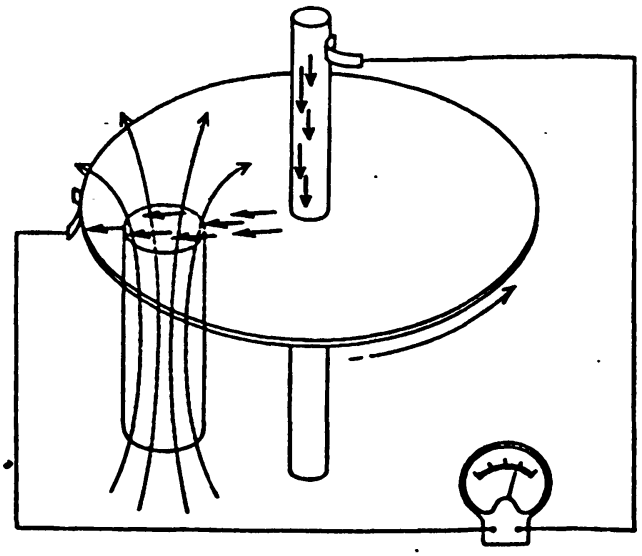
Ο πυρήνας της Γης έχει συνολική ακτίνα 3.485 km, ενώ ο σιδηρούχος στερεός εσωτερικός πυρήνας έχει μιά ακτίνα 1220 km. Στον πυρήνα έχει την έδρα του το μαγνητικό πεδίο της Γης, του οποίου δείχνουμε μερικές δυναμικές γραμμές

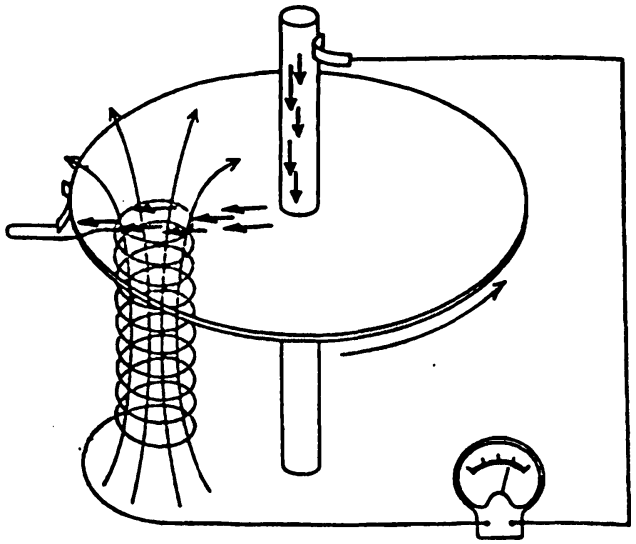
Σχήμα 13

Τα τελευταία χρόνια, από το 1958 και μετά, το γεωμαγνητικό πεδίο έχει μελετηθεί με κάθε λεπτομέρεια από τεχνητούς δορυφόρους που έχουν εκτοξευθεί για επιστημονικούς σκοπούς, και κυρίως από το δορυφόρο Magsat, ο οποίος εκτοξεύτηκε το 1980. Πολύτιμη βοήθεια προς αυτή την κατεύθυνση πρόσφερε επίσης και το πολικό σέλας. Όπως είναι γνωστό, ο άνεμος των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματίων που πλησιάζει τη Γη (κυρίως από τον Ηλιο) κάτω από την επίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου προσανατολίζεται προς τις βόρειες περιοχές, δημιουργώντας το φαντασμαγορικό φαινόμενο του πολικού σέλαος.

Είναι βασικό να τονίσουμε ότι για τη διατήρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων του πλανήτη μας χρειάζεται η συνεχής κατανάλωση κάποιας μορφής μηχανικής ενέργειας. Κι' αυτό γιατί, σύμφωνα με τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών του πυρήνα, τα οποιαδήποτε ηλεκτρικά ρεύματα δημιουργόντουσαν εκεί θα μπορούσαν να διατηρηθούν χωρίς τη δαπάνη της παραπάνω ενέργειας το πολύ για ένα διάστημα 10.000 ετών. Σίγουρα, όμως, το μαγνητικό πεδίο της Γης υπάρχει για αρκετά μεγάλο διάστημα της ιστορίας του πλανήτη μας (για πάνω από 3 δισεκατομμύρια χρόνια), και οπωσδήποτε κάποιος πρέπει να "πληρώνει" για τη διατήρησή του αυτή. Η ύπαρξη του πεδίου τόσο μεγάλο διάστημα μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί από τις μαγνητικές ιδιότητες παλιών ορυκτών.

Για να μπορέσει κανένας να αποκτήσει μια καλή εικόνα των χαρακτηριστικών του γεωμαγνητικού πεδίου θα έπρεπε να μπορεί να το μετρήσει στην επιφάνεια του πυρήνα, όπου εκτιμιέται ότι θα πρέπει να είναι 10 φορές περίπου ισχυρότερο απ' ότι στην επιφάνεια της Γης. Έτσι θα αφαιρείτο όλος ο "θόρυβος" των ενδιάμεσων υλικών και θα αναδεικνύονταν όλες οι ιδιαιτερότητές του, που πολύ πιθανόν δεν φτάνουν μέχρι την επιφάνεια της Γης. Σήμερα γίνονται πράγματι πολλές τέτοιες, επιτυχημένες γενικά, προσπάθειες προβολής του επιφανειακού πεδίου στην επιφάνεια του πυρήνα, με πολύ καλά και σημαντικά αποτελέσματα. Και είναι ακριβώς μέσα από τέτοιες προσπάθειες που τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην κατανόηση των μηχανισμών που λειτουργούν στον πυρήνα.





Το δυναμό του δίσκου του Faraday δημιουργεί ηλεκτρικά ρεύματα όταν ένας μεταλλικός δίσκος περιστρέφεται μέσα στις δυναμικές γραμμές ενός κοινού μαγνήτη (επάνω) ή ενός σωληνοειδούς (κάτω). Σε ένα αυτοσυντηρούμενο δυναμό (κάτω) τα ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργούνται ενισχύουν το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς, έτσι που τελικά δεν χρειάζεται καμιά εξωτερική πηγή μαγνητικού πεδίου, πέρα από εκείνη που αρχικά πυροδότησε το δυναμό.

Σχήμα 14

Το μοντέλο που είναι σήμερα το επικρατέστερο στην εξήγηση του γεωμαγνητικού πεδίου είναι το λεγόμενο "αυτοσυντηρούμενο δυναμό". Σαν "δυναμό", όπως είναι γνωστό, χαρακτηρίζουμε κάθε μηχανή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, και η πιο απλή απ' όλες είναι αυτή που διαθέτουν τα ποδήλατα για να τροφοδοτούν τα φανάρια τους με ηλεκτρικό ρεύμα. Το επίθετο "αυτοσυντηρούμενο", από την άλλη μεριά υποδηλώνει ότι στον πυρήνα υπάρχουν ρεύματα τα οποία συνεχώς κρατάνε στη ζωή το πεδίο και δεν το αφήνουν να σβήσει. Βέβαια, για την κίνηση των ρευμάτων αυτών χρειάζεται μηχανική ενέργεια, η οποία, όμως, αφαιρείται από τον ίδιο τον πλανήτη μας, και έτσι δεν υπάρχει τελικά καμιά εξωτερική πηγή η οποία να τροφοδοτεί το γεωμαγνητικό πεδίο. Έτσι, λοιπόν, από τη στιγμή που άρχισε τη λειτουργία του, με ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο θα μπορούσε να ήταν πολύ μικρό, το δυναμό δημιούργησε το δικό του πεδίο χωρίς τη βοήθεια κανενός εξωτερικού παράγοντα. Το γήινο δυναμό, μάλιστα, θα μπορούσε να έχει αρχικά διεγερθεί από το ασθενές μαγνητικό πεδίο που υπάρχει διάχυτο σ' ολόκληρο το γαλαξία μας. Από εκείνη τη στιγμή και πέρα το δυναμό θα έπαιρνε την κατάσταση στα χέρια του και θα δημιουργούσε από μόνο του ένα πολύ ισχυρότερο πεδίο.

Για την απαραίτητη μηχανική ενέργεια που αναφέραμε παραπάνω έχουν προταθεί δυο κυρίως μηχανισμοί. Ο πρώτος, ο θερμικός, πρεσβεύει ότι υπάρχει μια θερμική κίνηση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματίων στον πυρήνα. Όπως συμβαίνει σε πολλές ανάλογες περιπτώσεις καθημερινής εμπειρίας όταν ένα ρευστό (στη συγκεκριμένη περίπτωση το ρευστό του εξωτερικού πυρήνα) ζεσταίνεται από κάτω, πιο θερμές, και άρα και με μικρότερη πυκνότητα, μάζες ανυψώνονται, ενώ πιο κρύες, και άρα και με μεγαλύτερη πυκνότητα, μάζες καταβυθίζονται. Η θερμική αυτή κυκλοφορία του εξωτερικού πυρήνα μας δίνει την απαραίτητη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων για την οποία μιλήσαμε παραπάνω.

Ο δεύτερος μηχανισμός θεωρεί και αυτός ότι υπάρχουν στον πυρήνα περιοχές διαφορετικής πυκνότητας λόγω όμως της χημικής τους σύστασης και όχι λόγω της θερμοκρασίας τους. Έτσι, υγρά μεταλλικά μίγματα του πυρήνα με μικρή

πυκνότητα ανυψώνονται, ενώ στερεά κρυσταλλικά μίγματα καταβυθίζονται, σημιουργώντας και πάλι τα αναγκαία ηλεκτρικά ρεύματα. Από τα πειραματικά δεδομένα το πρώτο μοντέλο φαίνεται να είναι πολύ πιο πιθανό από το δεύτερο. Σημειώστε ότι στο δεύτερο μοντέλο ο πυρήνας είναι ισόθερμος, δηλαδή έχει παντού την ίδια θερμοκρασία. Στο θερμικό μηχανισμό δεν χρειαζόμαστε διαφορετική χημική σύνθεση. Χρειαζόμαστε μόνο μια πηγή θερμικής ενέργειας. Μια τέτοια πιθανή πηγή είναι τα ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στο εσωτερικό, και κυρίως ουράνιο -238 και κάλιο -40 που ξέρουμε ότι υπάρχουν στον μανδύα και το φλοιό. Δεν ξέρουμε όμως αν υπάρχουν στην αφθονία που τα θέλουμε και στον πυρήνα. Ενδείξεις για κάτι τέτοιο υπάρχουν, αλλά όχι στο βαθμό που να μην αφήνουν καμιά αμφιβολία. Άλλες πηγές θερμικής ενέργειας μπορούν να αναζητηθούν στην αρχική φάση δημιουργίας της Γης και του πυρήνα. Έτσι, η σημερινή θερμική ενέργεια του πυρήνα ίσως είναι κατάλοιπο εκείνης της πρωταρχικής ενέργειας κατά τη φάση της συστολής του αερίου που έφτιαξε τη Γη, η οποία δεν έχει ακόμη χαθεί και υπάρχει δεσμευμένη στον πυρήνα. Ίσως εκλύεται επίσης θερμότητα, υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας, από την κρυσταλλοποίηση των υγρών συστατικών του πυρήνα. Είναι επίσης σίγουρο ότι μηχανική ενέργεια για την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων στον εξωτερικό πυρήνα θα δίνει και η περιστροφή της Γης, κυρίως μέσα από τη δύναμη Coriolis. Η τελευταία αναπτύσσεται σε σώματα που κινούνται πάνω σ' ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, όπως είναι η Γη.

Έτσι, λοιπόν, ανακεφαλαιώνοντας θα πούμε τα εξής. Λόγω της περιστροφής της Γης αλλά και θερμοκρασιακών διαφορών πιστεύουμε ότι δημιουργείται μια ροή υλικών στο ρευστό εξωτερικό πυρήνα. Η ροή αυτή αγώγιμων υλικών αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο της Γης, όπως περιγράφουν οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού. Μια αλληλεπίδραση αυτής της μορφής έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός ηλεκτρικού ρεύματος, κατά τον ίδιο τρόπο που σ' ένα σύρμα το οποίο κινείται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό με τη σειρά του δημιουργεί ένα νέο μαγνητικό

πεδίο,το οποίο δρα προσθετικά και αυξάνει το μαγνητικό πεδίο της Γης. Έτσι, λοιπόν, το γεωδυναμό είναι αυτοσυντηρούμενο όπως είπαμε. Όσο δε οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στον πυρήνα λόγω της περιστροφής της Γης και των θερμοκρασιακών διαφορών υπάρχουν, τότε θα παρατηρούνται ηλεκτρικά ρευματα λόγω μετακίνησης αγώγιμων υλικών και θα δημιουργείται προσθετικό μαγνητικό πεδίο. Βέβαια, η απλή αυτή εικόνα δεν μπορεί να εξηγήσει όλες τις παρατηρούμενες ιδιομορφίες του πεδίου. Για παράδειγμα, από δεκαετία σε δεκαετία το πεδίο εξασθενεί κατά 1% περίπου, και σε μερικά μέρη φάινεται σαν να περιστρέφεται κατά 1 βαθμό ως προς την επιφάνεια της Γης. Αυτά, όπως και άλλα παραδείγματα, με πιο σημαντικό αυτό της αναστροφής της πολικότητας του πεδίου, για την οποία θα μιλήσουμε παρακάτω, μας δείχνουν ότι η ακριβής εικόνα θα πρέπει να είναι λίγο πιο πολύπλοκη.

Θα πρέπει να σημειώσουμε πάντως ότι, ούτως ή άλλως, από την καθαρά θεωρητική σκοπιά ή εύρεση των ακριβών χαρακτηριστικών που παράγουν το μαγνητικό πεδίο είναι από μόνη της αρκετά δύσκολη υπόθεση. Εκτός από τις δυνάμεις Lorentz που μπαίνουν αναπόφευκτα στο παιχνίδι, πάνω στα ρεύματα ασκούνται, όπως είπαμε και δυνάμεις Coriolis. Επίσης εκτιμιέται ότι τοπικές ιδιαιτερότητες, κύρια στη μεταβατική ζώνη που χωρίζει τον πυρήνα από το μανδύα, όπως και ηλεκτρομαγνητική ζεύξη του πυρήνα με το κατώτατο μέρος του μανδύα στο οποίο υπάρχουν οξείδια του σιδήρου, κάνουν την όλη εικόνα αρκετά πολύπλοκη.

Οι μαγνητικές αναστροφές

Πριν, όμως, προχωρήσουμε να δούμε σε ποιο σημείο είναι οι έρευνες σχετικά με τα ηλεκτρικά ρεύματα του εξωτερικού πυρήνα, θα αφιερώσουμε λίγο χώρο σε μια πολλή σημαντική, αλλα ταυτόχρονα και πιο δυσνόητη ιδιότητα του γεωμαγνητικού πεδίου, την αναστροφή της πολικότητάς του. Έτσι, σήμερα σε σχέση με την πολικότητα της διπολικής σινιστώσας του μαγνητικού πεδίου της

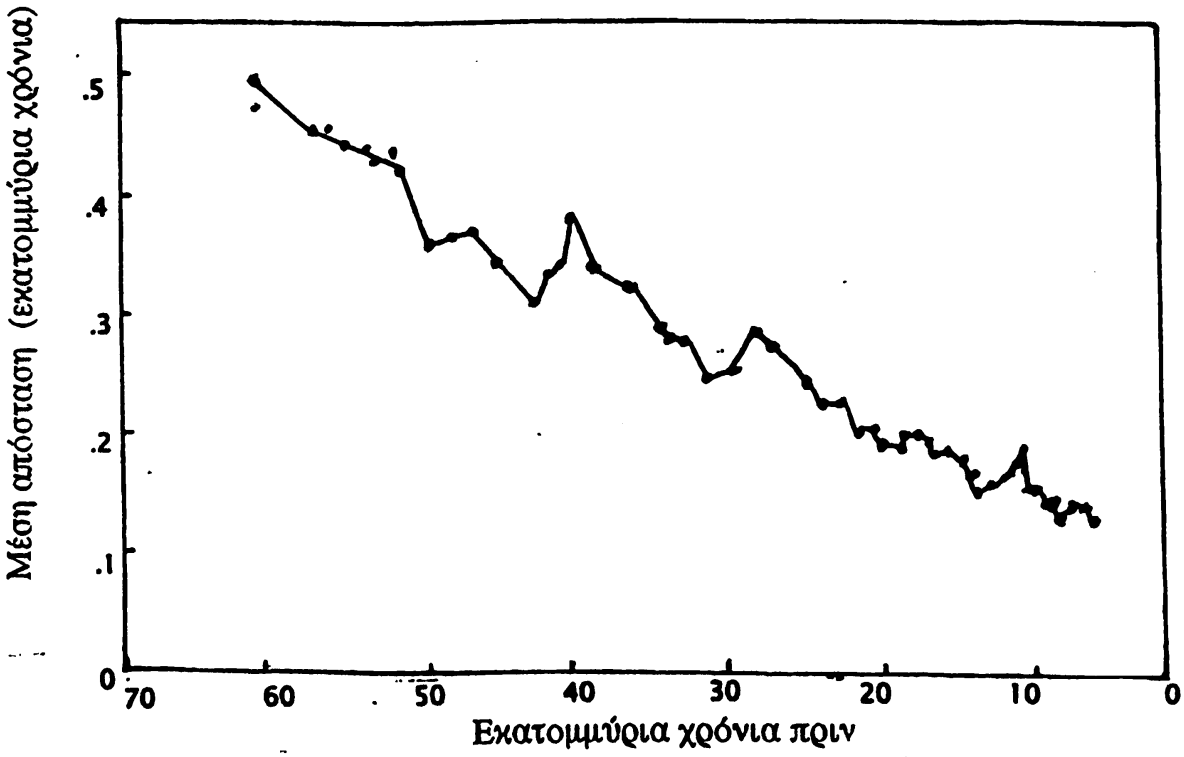
Οι αναστροφές του γήινου μαγνητικού πεδίου τα τελευταία 70 εκατομμύρια χρόνια, όπως προκύπτει από αναλύσεις ιζημάτων και λάβας. Στις μαύρες περιοχές η πολικότητα του πεδίου ήταν κανονική.

Σχήμα 15

Γης, γνωρίζουμε ότι οι δυο της πόλοι είναι κοντά στους αντίστοιχους γεωγραφικούς πόλους. Δηλαδή, το πεδίο έχει μια κανονική πολικότητα, όπως λέμε. Αυτό, όμως, δεν είναι κάτι που ίσχυε πάντοτε.

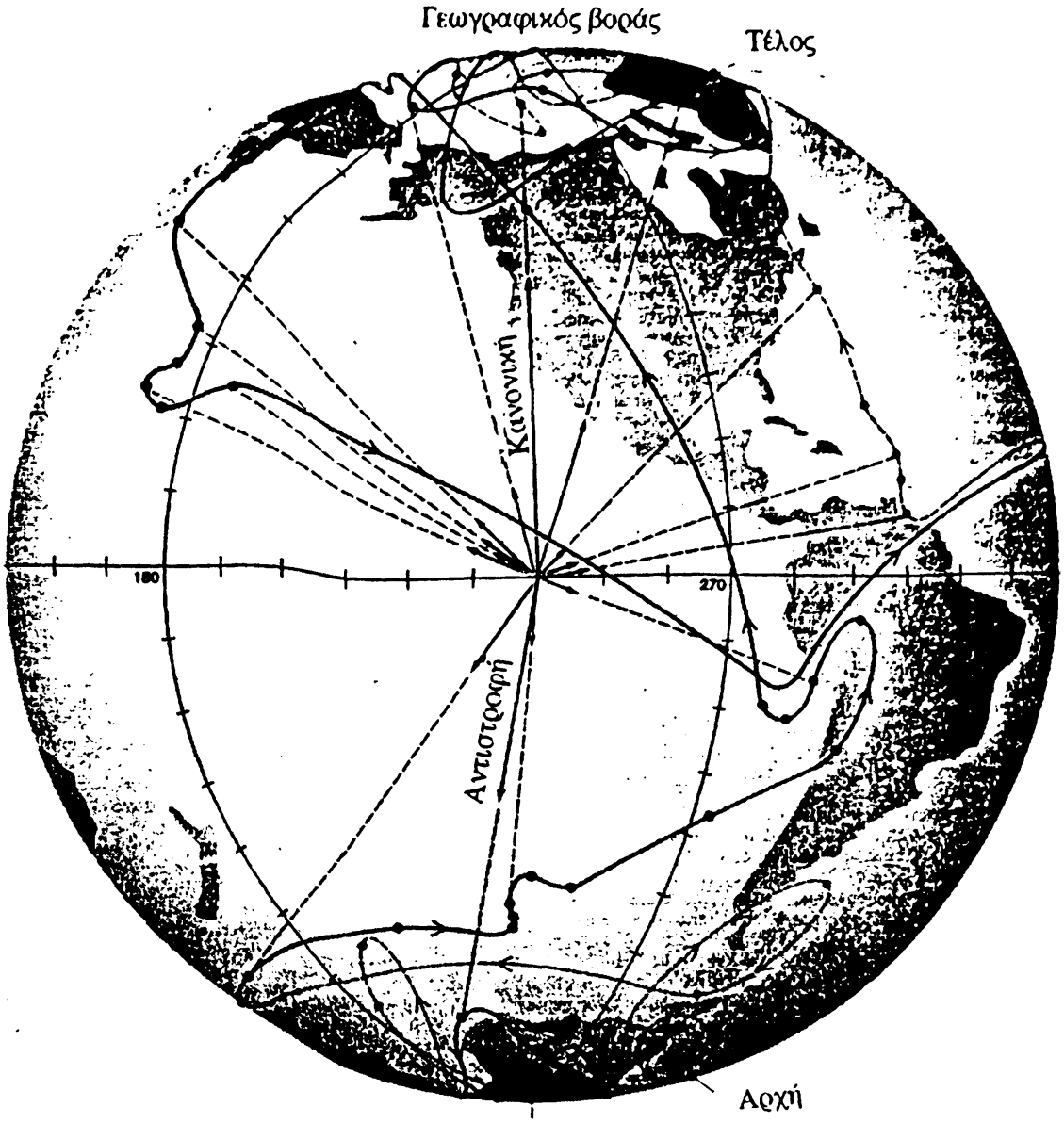
Την πολικότητα του μαγνητικού πεδίου πολλά χρόνια πριν, μπορούμε να τη βρούμε από τη μαγνήτιση παλιών πετρωμάτων. Έτσι, τα πετρώματα αποκτούν μια ελαφρά μαγνήτιση κατά το σχηματισμό τους (στην περίπτωση της λάβας όταν κρυώνει και στην περίπτωση ιζημάτων όταν αποτίθενται). Η πολικότητα του μαγνητισμού τους προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου, όποια είναι η κατεύθυνση αυτή την παράπάνω περίοδο. Στο χρονικό διάστημα των τελευταίων 170 εκατομμυρίων χρόνων έγιναν περίπου 300 αναστροφές του μαγνητικού πεδίου, με ένα πολύ παράξενο διάστημα ηρεμίας ανάμεσα στα 110 και 75 εκατομμύρια χρόνια. Τα τελευταία 30 εκατομμύρια χρόνια γινόντουσαν 4 αναστροφές ανά ένα εκατομμύριο χρόνια, ενώ τα τελευταία 10 εκατομμύρια χρόνια ο ρυθμός αυτός έχει πέσει σε μία αναστροφή κάθε 500.000 χρόνια περίπου. Σε μια αναστροφή ο βόρειος και νότιος μαγνητικός πόλος πηγαίνουν στο νότιο και βόρειο γεωγραφικό πόλο αντίστοιχα. Βέβαια η αναστροφή δεν είναι στιγμιαία, αλλά κρατάει αρκετό καιρό, μερικές χιλιάδες χρόνια. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι κατά μέσον όρο το γήινο μαγνητικό πεδίο είναι κατά 98% με σταθερή πολικότητα, και μόνο κατά 2% ασταθές οπότε βρισκόμαστε στο μεταβατικό στάδιο. Στο στάδιο αυτό ο καθένας από τους δυο πόλους διαγράφει μια πολύπλοκη τροχιά στην επιφάνεια της Γης, ανάμεσα στους δυο γεωγραφικούς πόλους.

Από τις πιο καλά μελετημένες αναστροφές είναι αυτή που έλαβε χώρα πριν 15 εκατομμύρια χρόνια, και έχει καταγραφεί στις μαγνητικές ιδιότητες ενός στρώματος λάβας στα όρη Steen στο Oregon. Η αναστροφή αυτή κράτησε περίπου 15.000 χρόνια, και έφερε τους δυο μαγνητικούς πόλους από την ανάστροφη στην κανονική τους θέση. Κατά τη διάρκεια της αναστροφής, το μαγνητικό πεδίο δεν ήταν όπως είπαμε το απλό σχεδόν διπολικό πεδίο που καταγράφουμε σε περιόδους



Ο μέσος χρόνος στον οποίον το μαγνητικό πεδίο της Γης έχει σταθερή πολικότητα, κανονική ή ανάστροφη, φαίνεται να μικραίνει καθώς πλησιάζουμε τη σημερινή εποχή. Ετσι, στο πρόσφατο παρελθόν οι αναστροφές του πεδίου ήταν πιό συχνές απ' ότι στο απώτερο παρελθόν. Αυτό είναι ένα παραπέρα πρόβλημα που θα πρέπει να βρει την ερμηνεία του στο σωστό μοντέλο.

Σχήμα 16



Η αναστροφή του γήινου μαγνητικού πεδίου η οποία έλαβε χώρα πριν από 15 εκατομμύρια χρόνια, έτσι όπως καταγράφεται στη λάβα του όρους Steens στο Oregon των ΗΠΑ. Ο βόρειος μαγνητικός πόλος ακολούθησε ένα πολύπλοκο μονοπάτι, σε ένα ταξίδι που κράτησε 15.000 χρόνια

Σχήμα 17

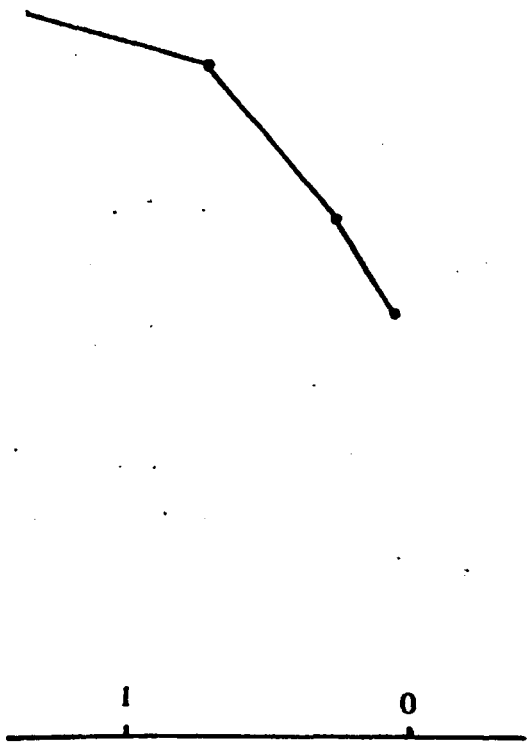
σταθερότητας, αλλά ένα πολύπλοκο πολυπολικό, αντικατοπτρίζοντας τις πολύπλοκες διεργασίες που συνέβαιναν στο μηχανισμό που το παράγει. Αν υποθέσουμε ότι είχαμε μια πυξίδα που μπορούσε να κινηθεί δεξιά- αριστερά, τότε στην αναστροφή που περιγράφει η λάβα του Steens

Mountain θα έκανε τις εξής κινήσεις. Αρχικά θα ήταν προσανατολισμένη προς το Νότιο γεωγραφικό Πόλο, όπου βρισκόταν ο Βόρειος μαγνητικός Πόλος. Στη συνέχεια θα άρχιζε να κλίνει προς τα κάτω, αργά αλλά σταθερά. Όταν αποκτούσε μια συγκεκριμένη ενδιάμεση κλίση ξαφνικά θα έκανε ένα σχετικά γρήγορο πήδημα και θα προσανατολιζόταν προς το Βόρειο γεωγραφικό Πόλο, όπου και θα είχε μεταβεί ο Βόρειος μαγνητικός Πόλος. Στη θέση αυτή, πάντως, δεν θα παρέμενε για πολύ μιας και με ένα γρήγορο και πάλι πήδημα η πυξίδα θα ξαναγύριζε στην ενδιάμεση θέση που αναφέραμε παραπάνω, σημάδι ότι ο Βόρειος μαγνητικός Πόλος μετακόμισε από την κανονική του θέση. Από τη νέα θέση, η πυξίδα θα ξεκινούσε και πάλι, με μια απόκλιση τώρα και προς ανατολάς, ένα αργό ταξίδι για να προσανατολιστεί μόνιμα πια προς το Βόρειο γεωγραφικό Πόλο. Σημάδι ότι η δεύτερη αυτή προσπάθεια αναστροφής στην κανονική πολικότητα ήταν πετυχημένη. Γενικά, όχι μόνο στην παραπάνω περίπτωση αλά και σε άλλες, φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια των αναστροφών το πεδίο άλλες φορές κινείται γρήγορα και άλλες φορές παραμένει στάσιμο, άλλες φορές κάνει επιτυχημένες προσπάθειες αναστροφής και άλλες όχι, οπότε και αναδιπλώνεται. Στο μεταξύ, σε όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις η ένταση του πεδίου υφίσταται μεγάλες μεταβολές, σε σχέση με την ένταση που έχει στην κανονική ή την ανάστροφη πολικότητα.

Σε τι οφείλονται οι αλλαγές της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου της Γης; Πολύ πιθανό σε στροβίλους ή άλλες διαταραχές στις τροχιές που διαγράφουν τα ηλεκτρικά ρεύματα του πυρήνα, ή μπορεί ακόμη να είναι και μια διαδικασία που συμβαίνει χωρίς πρόσθετες διαταραχές αλλά από μόνη της. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, χωρίς όμως αυτή τη στιγμή να μπορούμε να πούμε ότι κατέχουμε όλα τα μυστικά των όσων συντελούνται στον πυρήνα.

Μερικοί υποστηρίζουν ότι στην πραγματικότητα στον πυρήνα δεν υπάρχει μόνο μια κυκλοφορία ηλεκτρικών φορτίων, αλλά δυο αντιμαχόμενες μεταξύ τους. Η αναστροφή του μαγνητικού πεδίου παρατηρείται όταν η κυκλοφορία που έχει αποκατασταθεί για κάμποσο καιρό σταματά και αρχίζει τη λειτουργία της η άλλη. Υπάρχει δηλαδή ένα είδος κβαντικού πηδήματος ανάμεσα στις δυο κυκλοφορίες. Η θεωρία αυτή, όμως, δεν ερμηνεύει την πολύπλοκη εικόνα που παρατηρείται ανάμεσα στις δυο πολικότητες, και η οποία κρατά αρκετά χρόνια. Υπάρχει επίσης η άποψη ότι τα μαγνητικά πεδία των πλανητών έχουν τη συμπεριφορά των χαοτικών συστημάτων. Τέτοια συστήματα έχουν πράγματι στη δυναμική τους τη δυνατότητα αναστροφής της πολικότητάς τους, και επίσης ερμηνεύουν την πολύπλοκη μεταβατική κατάσταση που παρατηρείται ανάμεσα στις δυο πολικότητες. Ένα είναι σίγουρο μόνο, από μελέτες του μαγνητισμού παλιών ορυκτών. Ότι όποιος μηχανισμός κι' αν λειτουργεί στον πυρήνα, είναι ο ίδιος εδώ και κοντά 3.6 δισεκατομμύρια χρόνια.

Έχει επίσης διατυπωθεί η άποψη ότι οι αναστροφές περιλαμβάνουν και μια ενδιάμεση στις δυο αντίθετες πολικότητες κατάσταση. Η κατάσταση αυτή φαίνεται να παίζει το ρόλο ενός σταθμού ανάπαυσης για λίγο του πεδίου, μέχρι να αποφασίσει αν το επόμενο βήμα του θα είναι να ξαναγυρίσει στην πολικότητα από την οποία ξεκίνησε ή να συνεχίσει την πορεία του για μια αναστροφή της πολικότητας. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μια ανεπιτυχή προσπάθεια αναστροφής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η προσπάθεια κρίνεται πετυχημένη. Ανεπιτυχείς προσπάθειες αναστροφής έχουν καταγραφεί, για παράδειγμα, στο ηφαίστειο Liverpool στην Ανατολική Αυστραλία. Έτσι, η ενδιάμεση κατάσταση θα πρέπει, αν πράγματι υπάρχει, να είναι μια σχετικά σταθερή κατάσταση, μιας και απ' αυτήν επιτρέπονται πηδήματα και προς τις δυο κατευθύνσεις.



Τα τελευταία χρόνια η διπολική συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της Γης μειώνεται συνεχώς. Ο κάθετος άξονας αντιστοιχεί στο λόγο ρ της εκάστοτε τιμής της συνιστώσας αυτής διαιρεμένης με την τιμή της το έτος 1980. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου στο παρελθόν υπολογίστηκαν από διάφορες ιστορικές πηγές.

Σχήμα 18

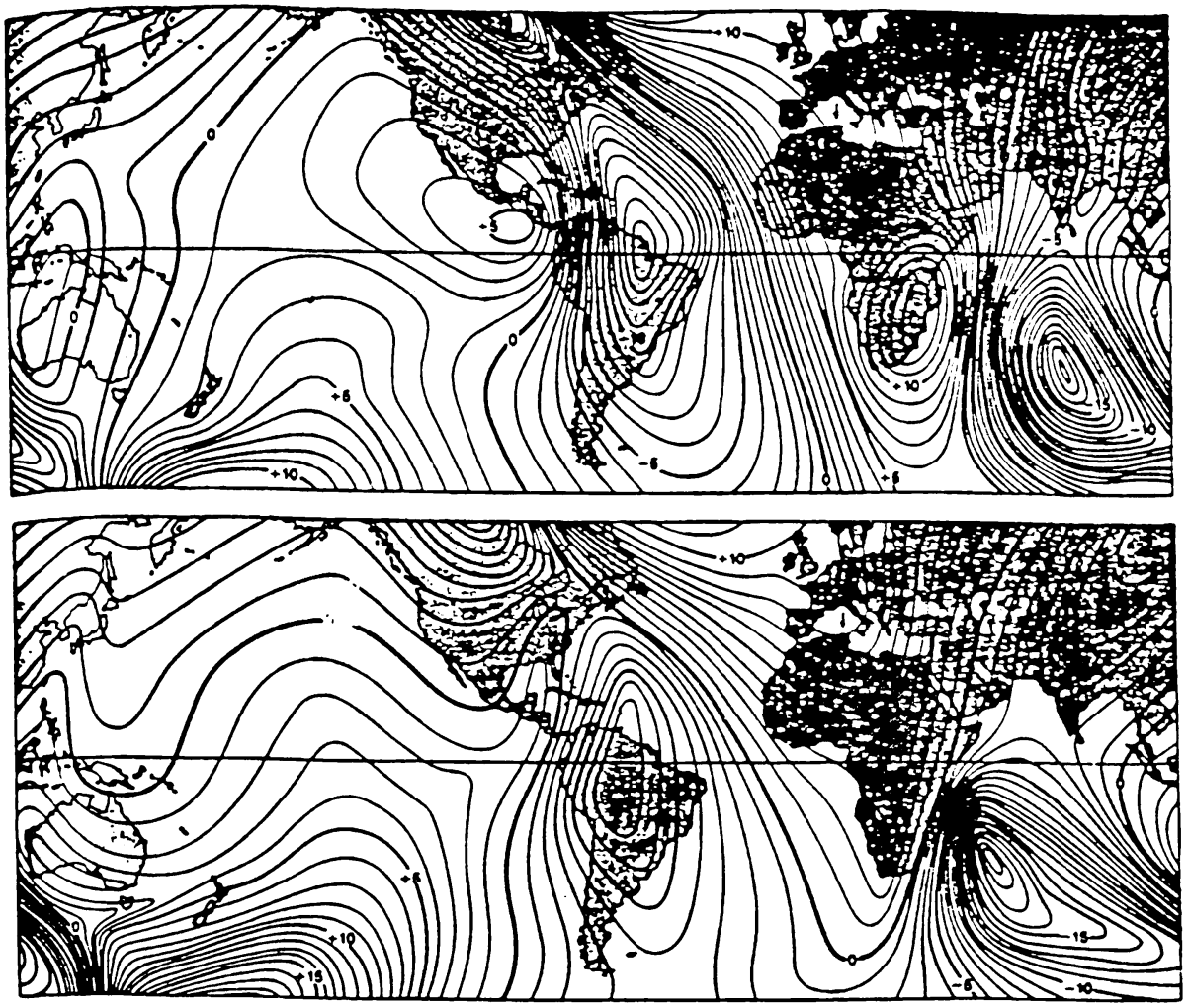
Σε ποια φάση βρίσκεται σήμερα το γήινο μαγνητικό πεδίο; Από μαγνητικές καταγραφές εδώ και 380 περίπου χρόνια αλλά και από μετρήσεις σε ανθρώπινες κατασκευές που περιέχουν ρινίσματα σιδήρου και άρα έχουν μαγνήτιση (π.χ.

παλιά αγγεία) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το πεδίο αυτό μειώνει τη διπολική του συνιστώσα αργά αλλά σταθερά. Με το ρυθμό, μάλιστα, μείωσης που διαπιστώνεται σε 2.000 χρόνια περίπου το πεδίο θα μηδενιστεί τελείως. Είναι δύκολο, όμως, τελικά να εκτιμήσουμε κατά πόσο αυτό δεν είναι αποτέλεσμα μιας διακύμανσής του γύρω από μια μέση τιμή, πράγμα που συνεπάγεται ότι από κάποια εποχή και πέρα θα αρχίσει και πάλι να ανακτά την ισχύ του, ή αν βρισκόμαστε πράγματι στο πρώτο στάδιο της αναστροφής του ή μιας προσπάθειας αναστροφής του. Στην ενδιάμεση περίπτωση, μετά από 2.000 χρόνια θα αρχίσει η διαδικασία μετάβασης του βόρειου μαγνητικού πόλου στο νότιο γεωγραφικό πόλο. Στο θέμα αυτό, όμως, θα επανέλθουμε και παρακάτω.

2.2.3. Το μαγνητικό πεδίο - Μια πιό λεπτομερής προσέγγιση

Πρόσφατες αναλύσεις του γεωμαγνητικού πεδίου δείχνουν ότι η μεγαλύτερη συνεισφορά στη διπολική συνιστώσα προέρχεται από τέσσερις περιοχές της επιφάνειας του πυρήνα. Αυτές οι περιοχές είναι συμμετρικά κατανεμημένες γύρω από τον Ισημερινό. Έτσι, τα κέντρα τους βρίσκονται στην τομή των γραμμών που ενώνουν τα σημεία 60° βόρεια, 60° νότια, 120° ανατολικά, 120° δυτικά. Είναι επίσης σίγουρο ότι η θέση των περιοχών αυτών δεν έχει αλλάξει κατά τη διάρκεια των ιστορικών χρόνων, πράγμα που υποδηλώνει μια σταθερότητά τους στη διαμόρφωση του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι παραπάνω περιοχές βρίσκονται κοντά σε πολικές περιοχές μικρής ροής του πεδίου, οι οποίες συνεισφέρουν πολύ λίγο στη διπολική συνιστώσα. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω πολικές περιοχές έχουν την ίδια διάμετρο με την προβολή του εσωτερικού πυρήνα στην επιφάνεια του εξωτερικού πυρήνα. Αυτό εξηγείται από ένα μοντέλο το οποίο προτάθηκε το 1973, και το οποίο πρεσβεύει ότι η ροή των υλικών του εξωτερικού πυρήνα μπορεί

να περιγραφεί από ένα ισοδύναμο μηχανικό ανάλογο, στο οποίο μια μικρή σφαίρα



Το σχήμα δείχνει τη μακράς - διάρκειας μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της Γης (secular variation). Ο επάνω χάρτης δείχνει την κατάσταση το 1912, και ο κάτω 30 χρόνια αργότερα, δηλαδή το 1942. Οι γραμμές σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να αποτυπώνουν το ρυθμό μεταβολής σε πρώτα λεπτά του τόξου ανά έτος της απόκλισης μιάς πυξίδας από το γεωγραφικό βορά. Οι θετικοί αριθμοί δείχνουν ότι η πυξίδα απομακρύνθηκε από το βορά, και το αντίθετο οι αρνητικοί αριθμοί.

Σχήμα 19

περιστρέφεται στο εσωτερικό μας μεγαλύτερης σφαίρας που είναι γεμάτη με νερό. Στο μηχανικό αυτό μοντέλο βρέθηκε ότι η ροή του νερού πάνω και κάτω από τα σημεία (πόλοι) που καθορίζουν τον άξονα περιστροφής ήταν ασθενέστερη απ' όλες τις υπόλοιπες περιοχές. Εάν πράγματι η ροή στον εξωτερικό πυρήνα είναι παρόμοια, τότε κανένας περιμένει η ροή του μαγνητικού πεδίου να είναι ασθενέστερη γύρω από τους πόλους.

Οι τέσσερες περιοχές στην επιφάνεια του εξωτερικού πυρήνα οι οποίες δίνουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη διπολική συνιστώσα, θα πρέπει να είναι οι κορυφές και οι βάσεις δυο "σωλήνων" ροής ρευστού υλικού. Μέσα σ' αυτούς το υγρό κυκλοφορεί σπειροειδώς σαν να σχηματίζει δηλαδή ένα ελατήριο. Φαίνεται πιθανόν ότι οι σωλήνες αυτοί ακουμπάνε στα όρια του εξωτερικού πυρήνα και εκτείνονται παράλληλα στον άξονα περιστροφής της Γης. Υπάρχουν δε υποψίες ότι ανάμεσά τους ίσως υπάρχει και ένας τρίτος τέτοιος σωλήνας. Εάν αυτό αποδίδει την πραγματικότητα, μέσα στους σωλήνες θα πρέπει να υπάρχει μεγαλύτερη κυκλοφορία ρευστού, απ' ότι σε άλλες περιοχές, από την οποία και γεννιέται το κυρίως μαγνητικό πεδίο. Από την κίνηση των ρευστών υλικών στους σωλήνες ενδέχεται επίσης να δημιουργούνται παραπέρα "κυματισμοί" στον πυρήνα, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για μερικές ιδιαιτερότητες του γεωμαγνητικού πεδίου που χαλάνε την απλή διπολική μορφή του.

Όμως εκτός από τα βασικά γνωρίσματα μας ενδιαφέρουν και οι οποιεσδήποτε ανωμαλίες του πεδίου. Αυτές είναι δυνατόν να μελετηθούν από τους μαγνητικούς χάρτες που σχεδιάζονται στην επιφάνεια της Γης και από τους οποίους στη συνέχεια οι επιστήμονες είναι σε θέση μέσω των ηλεκτρονικών υπολογιστών να παίρνουν χάρτες για τη μορφή του πεδίου στα όρια του πυρήνα και του μανδύα. Αυτό είναι πάρα πολύ σημαντικό για να μπορέσει κανένας να κατανοήσει όλες τις λεπτομέρειες του πεδίου αυτού. Τέτοιοι χάρτες έχουν σχεδιαστεί για τα τελευταία 380 χρόνια, με όση ακρίβεια, βέβαια, μπορεί κανείς να περιμένει από τις παλιές καταγραφές. Από τέτοιους μαγνητικούς χάρτες είμαστε σε θέση να καταλήγουμε σε συμπεράσματα όπως αυτά που διατυπώθηκαν

παραπάνω, αλλά και στην εξακρίβωση μεταβολών και ανωμαλιών του πεδίου. Μ' αυτόν τον τρόπο αποδείχτηκε η ύπαρξη μιας μεταβολής του, η οποία ονομάζεται "secular variation". Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για όλες εκείνες τις αλλαγές που παρατηρούνται σε διάστημα από κάποιες δεκαετίες έως δεκάδες χιλιάδες έτη. Ανάμεσα στις πιο σημαντικές αλλαγές είναι και η μείωση της διπολικής συνιστώσας του πεδίου για την οποία μιλήσαμε παραπάνω όπως και μια μετατόπιση προς τα δυτικά ενός τμήματος του πεδίου. Έτσι, από μετρήσεις, για παράδειγμα, σε κεραμεικά της Ρωμαϊκής εποχής, διαπιστώνουμε ότι η διπολική συνιστώσα ήταν σημαντικά πιο ισχυρή περίπου 2.000 χρόνια πριν. Τα παραπάνω κεραμεικά περιέχουν ρινίσματα σιδήρου τα οποία μαγνητίζονται και αποτελούν μάρτυρες της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου την εποχή της κατασκευής τους. Με το ρυθμό αυτό στο τέλος των επόμενων δυο χιλιετιών αναμένεται ότι η διπολική συνιστώσα θα μηδενιστεί τελικά, όπως είπαμε.

Παραπέρα αναλύσεις των μαγνητικών χαρτών στα όρια μανδύα- πυρήνα έδειξαν ότι στον Ατλαντικό ωκεανό, από 90° δυτικά έως 90° ανατολικά, το πεδίο έχει μια συνεχή μετατόπιση προς τα δυτικά. Αυτό φαίνεται να σχετίζεται όπως θα δούμε, με μια παρόμοια κίνηση που γίνεται προς τα δυτικά από οργανωμένες περιοχές του πυρήνα (κηλίδες) με ρυθμό περίπου 10 km ανά έτος. Οι πυρηνικές κηλίδες είναι καλά οργανωμένες περιοχές στην επιφάνεια του εξωτερικού πυρήνα από τις οποίες ξεκινάνε δυναμικές μαγνητικές γραμμές, η ροή των οποίων είναι αντίθετη με αυτή που έχει η σημερινή πολικότητα του πεδίου. Υπάρχουν δε ενδείξεις ότι οι κηλίδες σχετίζονται με ιδιαίτερα ζεστές περιοχές του μανδύα, κοντά στα όριά του με τον πυρήνα. Η μείωση μάλιστα της διπολικής συνιστώσας φαίνεται να σχετίζεται και αυτή με τη μετακίνηση των ανώμαλων αυτών περιοχών του πυρήνα, Έτσι, πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι η μείωση της έντασης της διπολικής συνιστώσας του πεδίου που παρατηρείται εδώ και αρκετά χρόνια οφείλεται και αυτή στην ποσοτική αύξηση και μετακίνηση δυο τέτοιων "ανωμαλιών" στον πυρήνα, οι οποίες υπάρχουν κάτω από την Αφρική και τον Ατλαντικό, και στις οποίες όπως είπαμε η ροή έχει αντίθετη διεύθυνση απ' αυτή

που παράγει τη διπολική συνιστώσα. Πιο συγκεκριμένα η παραπάνω μείωση φαίνεται να οφείλεται αφενός μεν στην αύξηση μιας κηλίδας του πυρήνα η οποία βρίσκεται κάτω από την Αφρική και στην κίνηση προς τα νότια μιας ανάλογης κηλίδας, η οποία βρίσκεται κάτω από τον Ατλαντικό. Η τελευταία καταγράφεται σε μαγνητικούς χάρτες ήδη από το 1650. Από τότε έχει μετακινηθεί προς τα δυτικά και στη συνέχεια προς τα νότια με μια ταχύτητα 0.1 βαθμούς πλάτους ανά έτος. Η Αφρικανική πυρηνική κηλίδα φαίνεται ότι σχηματίστηκε αρχικά κοντά στην Ινδονησία προς το τέλος του 18ου αιώνα αλλά η παρουσία της άρχισε να γίνεται αισθητή μόνο στις αρχές του 20ου αιώνα. Η κηλίδα αυτή έχει μετακινηθεί με μια ταχύτητα 0.3 βαθμούς πλάτους ανά έτος προς τα δυτικά.

Σύμφωνα με τις ενδείξεις παλιών μαγνητικών χαρτών υπάρχει η πεποίθηση ότι οι πυρηνικές κηλίδες σχηματίζονται κοντά στην Ινδονησία και μετατοπίζονται προς τα δυτικά με μια ταχύτητα 0.3 βαθμούς πλάτους ανά έτος. Όταν φτάνουν στα νότια της Αφρικής τότε αυξάνονται γρήγορα και στη συνέχεια διασχίζουν τον Ατλαντικό με μια αισθητά μικρότερη ταχύτητα (0.1 βαθμούς πλάτους ανά έτος) προς τα νότια. Σύμφωνα με αυτά, η κηλίδα που υπάρχει τώρα στον Ατλαντικό θα πρέπει να σχηματίστηκε πριν από 900 χρόνια, ενώ η ηλικία της αντίστοιχης κηλίδας της Αφρικής θα πρέπει να είναι 200 χρόνια. Η κίνηση των κηλίδων προς τα νότια, λόγω της αντίθετης ροής του υλικού τους, είναι αυτή που μειώνει τη διπολική συνιστώσα. Εάν μια καινούρια κηλίδα σχηματιστεί στο μέλλον, και κινηθεί με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω, τότε η διπολική συνιστώσα θα μειωθεί ακόμη περισσότερο και ίσως φτάσουμε και σε μια πλήρη αναστροφή του πεδίου. Απομένουν, όμως, να ξεκαθαριστούν πολλά πράγμα για να ποδειχθεί ότι πράγματι αυτός είναι ο λόγος που το γεωμαγνητικό πεδίο αναστρέφει την πολικότητά του από καιρό σε καιρό.

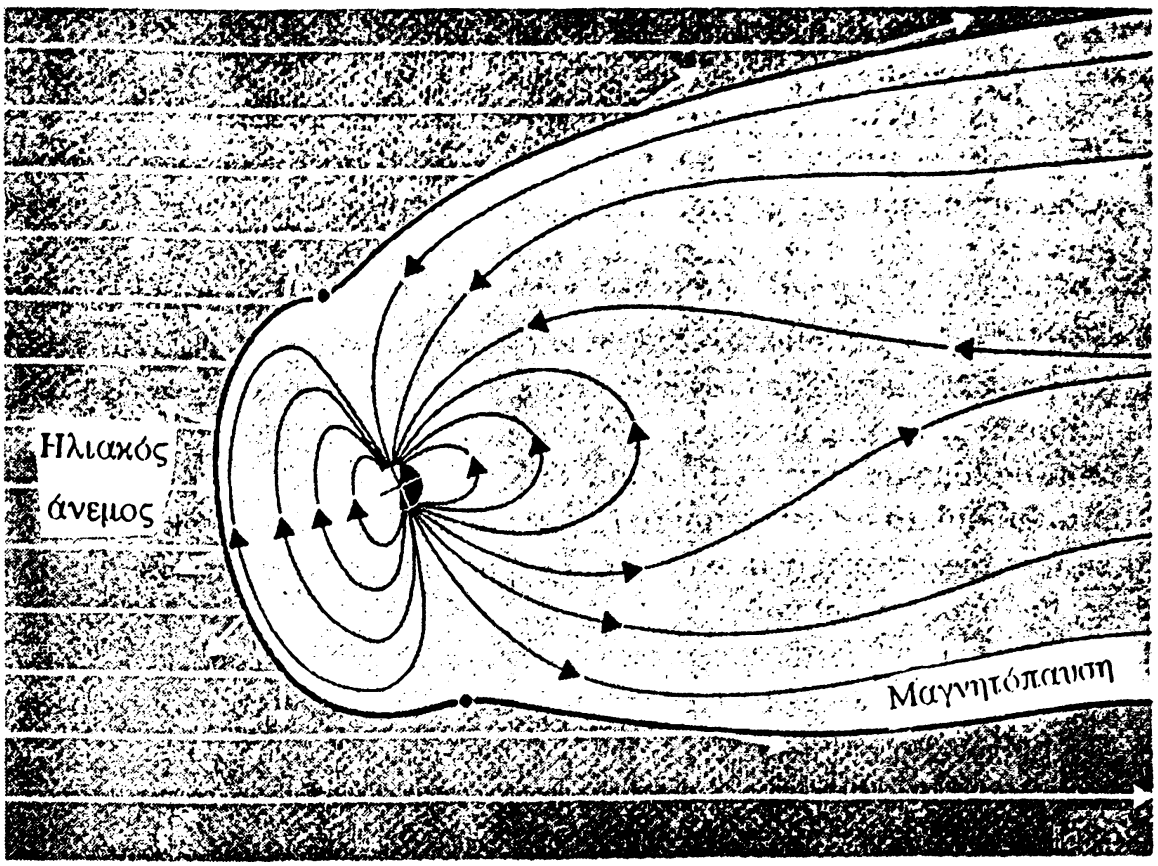
Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι από τις καταγραφές που υπάρχουν μέχρι σήμερα δεν έχει παρατηρηθεί μια διαδικασία διάλυσης μιας πυρηνικής κηλίδας. Σίγουρα, όμως, κάτι τέτοιο θα πρέπει να συμβαίνει σε περιόδους κατά τις οποίες έχουμε αύξηση της διπολικής συνιστώσας. Τα τελευταία 10

εκατομμύρια χρόνια το γεωμαγνητικό πεδίο αλλάζει πολικότητα κάθε 500.000 χρόνια περίπου όπως είπαμε. Η μείωση της έντασης, όμως, της διπολικής συνιστώσας έχει έναν πολύ πιο γρήγορο ρυθμό. Έτσι, φαίνεται ότι η αλλαγή της πολικότητας δεν γίνεται αμέσως μετά την εξαφάνιση της διπολικής συνιστώσας. Τελικά, βέβαια, και εφόσον οι πυρηνικές κηλίδες που προκάλεσαν την αναστροφή διαλυθούν, το αρχικό διπολικό πεδίο θα ξαναεμφανιστεί και πάλι.

Η παραπάνω εικόνα μας δείχνει, ότι στο βαθμό που αυτή είναι σωστή, στην ουσία η διπολική συνιστώσα του πεδίου ταλαντώνεται. Αυτό δε που προκαλεί τις ταλαντώσεις είναι οι πυρηνικές κηλίδες. Βέβαια, εξακολουθεί και παραμένει ένα μεγάλο ερωτηματικό, γιατί άλλες φορές η αναστροφή της πολικότητας του πεδίου έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ άλλες φορές υπάρχουν μεγάλα διαστήματα ηρεμίας. Έτσι, γνωρίζουμε από τη μαγνήτιση παλιών ορυκτών ότι κατά τη διάρκεια μεγάλων περιόδων της γήινης ιστορίας δεν σημειώθηκε καμιά αναστροφή του πεδίου, ενώ αντίθετα σε άλλες περιόδους είχαμε συχνές αναστροφές. Ταλάντωση, πάντως, της διπολικής συνιστώσας μπορούμε να έχουμε και από τους "κυματισμούς" που παράγονται στον υγρό εξωτερικό πυρήνα, λόγω της κίνησης υλικών στους σωλήνες, που περιγράψαμε παραπάνω. Εάν οι ταλαντώσεις αυτές μπορούν να πάρουν μεγάλες τιμές, τότε και αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε αναστροφή της πολικότητας του πεδίου.

Βέβαια, τα παραπάνω μένουν στο επίπεδο της περιγραφής και κάθε άλλο παρά εξηγούν την αιτία που τα γεννά, την αιτία δηλαδή που δημιουργεί και μετακινεί τις πυρηνικές κηλίδες, και μάλιστα τους σταθερούς ρυθμούς και δημιουργίας και μετακίνησής τους. Μιά πιθανή εξήγηση είναι ότι οι διάφορες ροές στον πυρήνα επηρεάζονται και από γεωμετρικές ή θερμοκρασιακές ανωμαλίες στα όρια του μανδύα και του πυρήνα. Το φαινόμενο αυτό είναι ανάλογο με αυτό που παρατηρείται στην κυκλοφορία του ατμοσφαιρικού αέρα στην επιφάνεια της Γης. Έτσι, ενώ στις πεδιάδες η ταχύτητα του αέρα είναι μικρή στις κορυφές των βουνών οι ρευματικές γραμμές πυκνώνουν και η ταχύτητα του αέρα είναι πιο μεγάλη. Αυτό είναι κάτι που προβλέπεται από την εξίσωση συνέχειας της κίνησης

του οποιουδήποτε ρευστού. Επίσης οι διάφορες θερμοκρασιακές και γεωμετρικές ανωμαλίες μπορούν να προκαλέσουν αποκλίσεις στη ροή των υλικών όπως και δημιουργία στροβίλων. Όπως θα δούμε δε παρακάτω, η διαχωριστική περιοχή πυρήνα-μανδύα κάθε άλλο παρά ομαλή και ήσυχη είναι.



Δείχνεται μιά απλοποιημένη εικόνα της μαγνητόσφαιρας. Ο ηλιακός άνεμος την επιμηκύνει προς την αντίθετη κατεύθυνση που βρίσκεται ο Ηλιος.

Σχήμα 20

Για την ιστορία να αναφέρουμε ότι η άποψη ότι το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη μας αναστρέφεται κάποιες εποχές είδε το φως της δημοσιότητας για πρώτη φορά το 1906. Την πρόβαλε ο Γάλλος φυσικός Bernard Brunhes, ο οποίος εντυπωσιάστηκε και ταυτόχρονα προβληματίστηκε όταν ανακάλυψε σε ορυκτά

μαγνήτιση αντίθετη απ' αυτή που δικαιολογεί η σημερινή πολικότητα του πεδίου. Μόνο, όμως, από το 1960 και μετά άρχισαν ολοκληρωμένες έρευνες για την ανακάλυψη παλιών αναστροφών του πεδίου σε ηφαιστειακές λάβες στη Νότια Αφρική. Οι έρευνες αυτές έδειξαν χωρίς καμιά αμφιβολία ότι μέσα στη δυναμική του γεωμαγνητικού πεδίου υπάρχει, πράγματι, και η διαδικασία της αναστροφής του.

Ας έρθουμε, όμως, να δούμε και κάποια στοιχεία για τα χαρακτηριστικά του γεωμαγνητικού πεδίου πέρα από την επιφάνεια του πλανήτη μας. Όπως είπαμε, από το 1958 και μετά αρκετοί τεχνητοί δορυφόροι έχουν μελετήσει τη μορφή που έχει το γήινο μαγνητικό πεδίο στο χώρο. Το συμπέρασμα είναι ότι το πεδίο αυτό δέχεται σημαντικές εξωτερικές επιδράσεις από τον ηλιακό άνεμο (τα φορτισμένα σωμάτια που εκπέμπονται από την ήλιο), το ενδοαστρικό μαγνητικό πεδίο, και τα ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργούν ηλεκτρισμένα σωμάτια που παγιδεύονται στην ατμόσφαιρα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα γεωμαγνητικό πεδίο που μοιάζει σαν μια σταγόνα νερού έτοιμη να πέσει με μια σημαντικά επιμηκυμένη ουρά. Αντί να εκτείνεται σε μια μεγάλη περιοχή, η δράση του περιορίζεται σε μια σαφώς καθορισμένη περιοχή του χώρου, η οποία ονομάζεται μαγνητόσφαιρα. Η μαγνητόσφαιρα περιβάλλεται από μια στενή περιοχή μεταβαλόμενων μαγνητικών χαρακτηριστικών, η οποία ονομάζεται μαγνητόπαυση. Η μαγνητόσφαιρα έχει μία ακτίνα περίπου 10 φορές την ακτίνα της Γης προς τη μεριά που υπάρχει ο Ήλιος, και τουλάχιστον 30 φορές την ακτίνα της Γης προς τη σκοτεινή πλευρά της Γης όπου και σχηματίζεται η ουρά της. Η μαγνητόπαυση έχει πάχος περίπου 100 km είναι δηλαδή η πολύ λεπτή επιδερμίδα της μαγνητόσφαιρας. Πέρα από τη μαγνητόπαυση το μαγνητικό πεδίο δεν μηδενίζεται, αλλά έχει μια τιμή που μεταβάλλεται ανάμεσα στα 10 με 50 gammas.

2.2.4 Η ζώνη D''

Πριν αφήσουμε τον πυρήνα για να συνεχίσουμε τη γνωριμία μας με το μανδύα, θα μείνουμε για λίγο στη μεταβατική περιοχή που χωρίζει τα δυο αυτά τμήματα του εσωτερικού της Γης. Όπως θα φανεί από τη σχετική συζήτηση πρόκειται για μια πολύ ενδιαφέρουσα ζώνη, με πολλές και σημαντικές ιδιότητες. Ο μανδύας φαίνεται ότι χωρίζεται από τον πυρήνα με πολύ απότομα όρια, χωρίς δηλαδή να υπάρχει μια σημαντική από άποψη έκτασης μεταβατική ζώνη ανάμεσά τους. Πιο συγκεκριμένα, η τελευταία δεν φαίνεται να ξεπερνά το πολύ μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, που είναι ένας εντυπωσιακά μικρός αριθμός για τα γεωφυσικά φαινόμενα του εσωτερικού της Γης.

Η μεταβατική περιοχή που χωρίζει τον πυρήνα και το μανδύα ονομάζεται ζώνη D'' και θεωρείται ότι είναι ένα μεγάλο θερμικό όριο και μια δεξαμενή που δέχεται και τα ελαφρά υλικά που διώχνει ο πυρήνας και βαριές ενώσεις που φεύγουν από το μανδύα. Η μεταβατική αυτή περιοχή θεωρείται επίσης ότι είναι μια ενεργός χημική ζώνη, στην οποία ο πυρήνας και ο μανδύας ανταλλάσσουν υλικά.

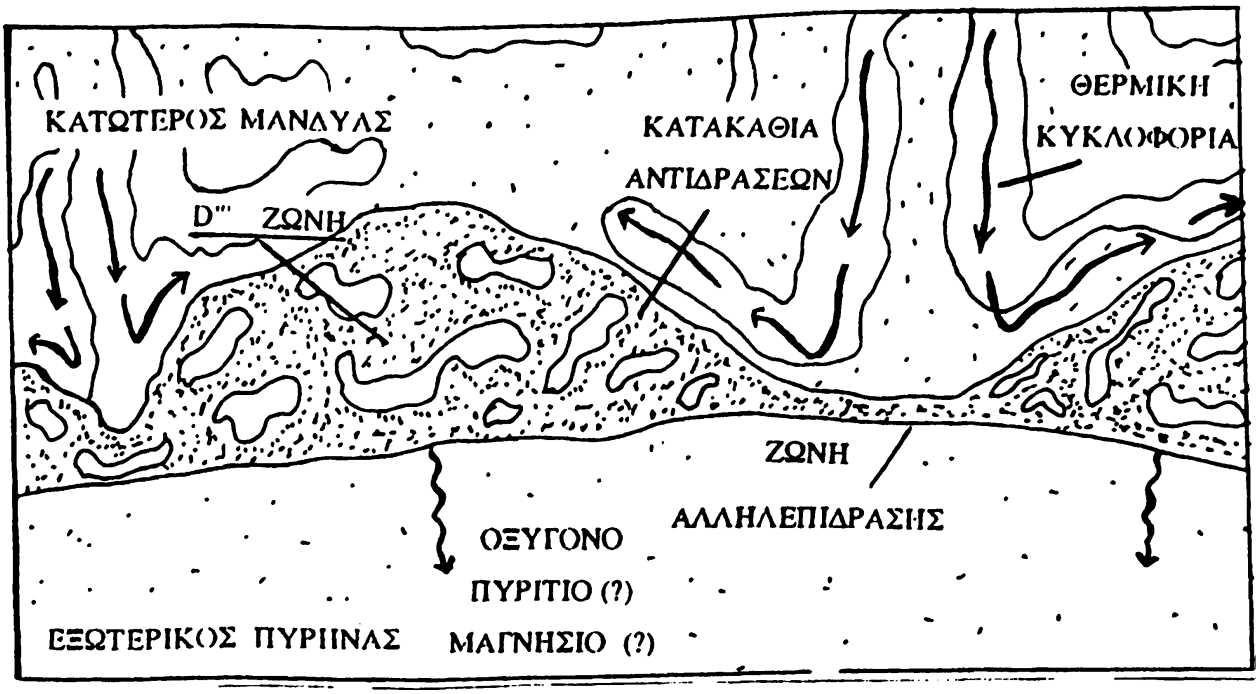
Στη μεταβατική ζώνη από τον πυρήνα προς το μανδύα εκτός από θερμότητα ανταλλάσσεται και γωνιακή ταχύτητα. Ο μηχανισμός ζεύξης γι' αυτή την ανταλλαγή μπορεί να είναι δυνάμεις Lorentz που δρουν στα αγώγιμα υλικά του κάτω τμήματος του εσωτερικού μανδύα, τοπογραφικές μεταβολές που δημιουργούν δυνάμεις από διαφορετική κατανομή της πίεσης, ή και τα δυο. Όπως είναι προφανές εάν ο παραπάνω μηχανισμός μεταβληθεί (και είναι δυνατόν να μεταβληθεί επειδή ο εξωτερικός πυρήνας είναι υγρός) προκύπτει αλλαγή στη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης και επομένως και μεταβολή στη διάρκεια της ημέρας. Ίσως, επίσης, μια τέτοια μεταβολή να συνεισφέρει στη διέγερση της ελεύθερης κλόνισης του άξονα της Γης (ταλάντωση Chandler).

Η κλόνιση του άξονα της Γης πιστεύεται ότι προκύπτει από διάφορες παλιρροϊκές δυνάμεις, όπως αυτές που δημιουργούν τριβή ανάμεσα στο στερεό

φλοιό της Γης από τη μια μεριά και την ατμόσφαιρα και τα νερά των θαλασσών από την άλλη μεριά, είτε λόγω ρευμάτων είτε και λόγω της επίδρασης του πεδίου βαρύτητας του Ηλιου και της Σελήνης. Από προσεκτικές μελέτες, όμως, που έγιναν στο Πανεπιστήμιο του Harvard στις Η.Π.Α., ανακαλύφθηκε μια συνιστώσα της κλόνισης η οποία δεν μπορούσε να εξηγηθεί από τις παλιρροϊκές δυνάμεις. Θεωρήθηκε, λοιπόν, ότι είναι αποτέλεσμα της δυναμικής της ζώνης D". Πιο συγκεκριμένα, εάν η ζώνη D" περιέχει και αγώγιμα υλικά (και θα πρέπει να περιέχει μιας και γειτονεύει με τον πυρήνα) το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα θα επάγει μικρά ηλεκτρικά ρεύματα σ' αυτήν. Τα μικρά αυτά ρεύματα δημιουργούν το δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με το κύριο μαγνητικό πεδίο του πυρήνα. Στην ουσία σε μια πρώτη προσέγγιση θα μπορούσαμε να πούμε ότι έχουμε έναν μεγάλο μαγνήτη και έναν μικρό, οι οποίοι μπορούν είτε να απωθούνται είτε να έλκονται. Είναι τώτα αυτή ακριβώς η αλληλεπίδραση ανάμεσα στον πυρήνα και τον μανδύα που φαίνεται ότι μπορεί να εξηγήσει τη συνιστώσα που αναφέραμε παραπάνω.

Από τα παραπάνω λοιπόν φαίνεται ότι, ίσως, η μεταβατική ζώνη ανάμεσα στο μανδύα και τον πυρήνα να είναι η πιο ενεργή γεωλογικά περιοχή του πλανήτη μας. Δεν θα ήταν υπερβολή δε να λέγαμε ότι καθώς πηγαίνουμε από τον πυρήνα προς το μανδύα μέσω αυτής της περιοχής, οι ετερογένειες που συναντάμε είναι μεγαλύτερες και από εκείνες ανάμεσα στο στερεό φλοιό και την ατμόσφαιρα. Πολλοί πιστεύουν ότι η δινναμική αυτής της περιοχής επηρεάζει όχι μόνον την κλόνιση του άξονα της Γης, αλλά και τα χαρακτηριστικά του γήινου μαγνητικού πεδίου. Και τέλος, ότι δυναμικές διεργασίες που γίνονται εκεί επηρεάζουν και τη θερμική κυκλοφορία του μανδύα, η οποία είναι υπεύθυνη για την τεκτονική δράση του πλανήτη μας.

Κατ' αρχήν η ζώνη D" διαφέρει δραστικά από το μανδύα. Αυτό γίνεται αμέσως αντιληπτό από τις μεταβολές των σεισμικών κυμάτων. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της αξονικής τομογραφίας διαπιστώνουμε ότι μέσα σ' αυτή βρίσκονται μεγάλες περιοχές, με διαστάσεις χοντρικά όσες και των ηπείρων στη γήινη



Η ζώνη D'' σχηματίζεται από τη χημική αλληλεπίδραση του πυρήνα και του μανδύα. Ετσι, τα ορυκτά του μανδύα διαλύονται εν μέρει στον υγρό σίδηρο του εξωτερικού πυρήνα, σχηματίζοντας κατακάθια πλούσια σε μέταλλα, τα οποία αποτίθενται στα όρια του μανδύα και του πυρήνα. Τα κατακάθια αυτά ανακατεύονται κατά κάποιον τρόπο από την κυκλοφορία του εσωτερικού μανδύα. Είναι πολύ πιθανόν ότι στο ανώτερο τμήμα του εξωτερικού πυρήνα υπάρχει μιά λεπτή ζώνη πλούσια σε οξυγόνο και πιθανόν σε πυρίτιο και μαγνήσιο.

Σχήμα 21

επιφάνεια, οι οποίες ξεχωρίζουν μεταξύ τους. Είναι δύσκολο όμως να εκτιμήσουμε αν πρόκειται για περιοχές που έχουν διαφορετική θερμοκρασία ή διαφορετική χημική σύσταση. Στη δεύτερη περίπτωση οι "ήπειροι" της ζώνης D" φαίνεται να είναι οι αντίστοιχες λιθοσφαιρικές πλάκες του στερεού φλοιού, με μια ανάλογη ίσως τεκτονική δράση. Ας μην ξεχνάμε, άλλωστε, ότι και ο μανδύας έχει θερμική κυκλοφορία. Το σημαντικό δε είναι ότι η απόσταση ανάμεσα στις παραπάνω ηπείρους είναι πολύ μικρή για τα γεωλογικά δεδομένα, μόνο μερικές δεκάδες χιλιόμετρα.

Η χρησιμοποίηση μιας νέας τεχνικής η οποία παρακολουθεί τη διαταραχή που υφίστανται τα μέτωπα κύματος των σεισμικών κυμάτων, έδωσε επίσης εντυπωσιακά αποτελέσματα και ως προς το πάχος της ζώνης D". Η τεχνική αυτή καταγράφει στα σεισμόμετρα τον τρόπο με τον οποίο ένα συμμετρικό κατ' αρχήν σεισμικό κύμα, χάνει τη συμμετρία του αυτή αφού ανακλαστεί σε μια τραχειά επιφάνεια για τα γεωλογικά δεδομένα, δηλαδή σε μια επιφάνεια με πολλές ανωμαλίες. Βρέθηκε έτσι ότι το πάχος της ζώνης D" μεταβάλλεται από περιοχές σε περιοχές από 300 km έως και μερικά χιλιόμετρα. Στην τελευταία περίπτωση, για τα γεωλογικά δεδομένα δεν υπάρχει σαφής καθορισμός ανάμεσα στο μανδύα και τον πυρήνα.

Είναι επίσης προφανές από τα όσα είπαμε παραπάνω, ότι οι μαγνητικές ιδιότητες της ζώνης D" θα καταγράφονται και στο γεωμαγνητικό πεδίο, σαν μικρές διαταραχές του. Πρόσφατα, μάλιστα, έγινε κατορθωτό, αλλάζοντας τις οριακές συνθήκες ανάμεσα στο μανδύα και τον πυρήνα και υποθέτοντας την ύπαρξη μιας αγώγιμης ζώνης D", να βρεθούν ενδιαφέρουσες λύσεις των μαγνητοϋδροδυναμικών εξισώσεων του πυρήνα, που προσεγγίζουν σημαντικά τα πειραματικά δεδομένα, και κυρίως τους μικρούς κυματισμούς της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου. Τέλος, δεν θα πρέπει να αποκλειστεί και η περίπτωση κατά την οποία η δυναμική της ζώνης αυτής πυροδοτεί και τις αναστροφές του γήινου μαγνητικού πεδίου.

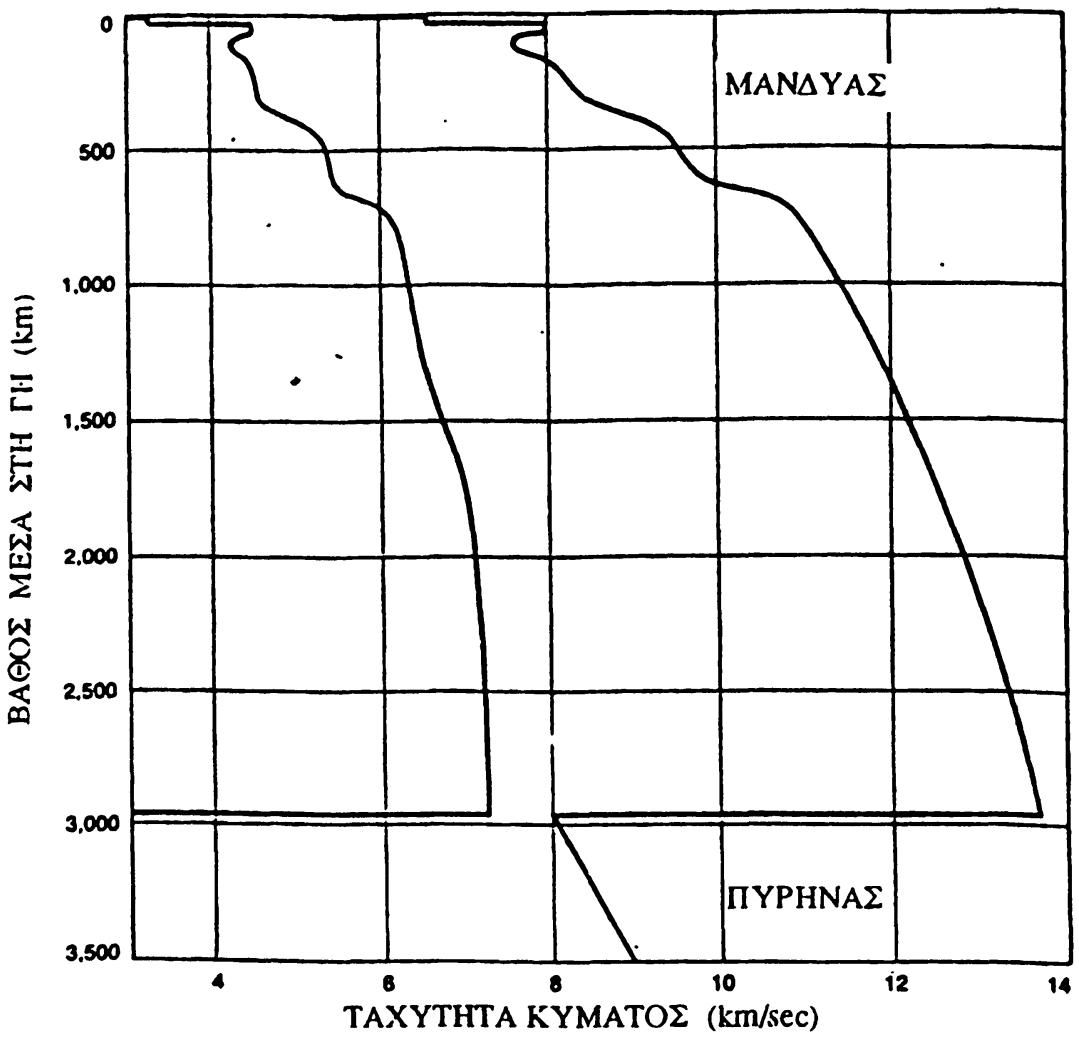
Μερικοί γεωφυσικοί έχουν προτείνει ότι η χημική σύνθεση του πυρήνα θα πρέπει να επηρεάζεται και από τη χημική σύνθεση του μανδύα που βρίσκεται από πάνω του. Σίγουρα, υγρό υλικό του εξωτερικού πυρήνα μπορεί να εισέρχεται σε ρωγμές του βραχώδους μανδύα μέχρι το πολύ λίγες εκατοντάδες μέτρα. Κάτι που είναι ανάλογο με τα τριχοειδή φαινόμενα. Επίσης, η διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο μανδύα και τον πυρήνα δεν περιμένουμε να είναι μια τέλεια σφαίρα, αλλά μια επιφάνεια με πολλές ανωμαλίες (υψώματα και βαθουλώματα) που πλησιάζει την επιφάνεια της σφαίρας. Έτσι, περιμένουμε να υπάρχει κάποιας μορφής χημική αλληλεπίδραση ανάμεσα στα υλικά του μανδύα και του εξωτερικού πυρήνα. Οι ενώσεις που σχηματίζονται από την αλληλεπίδραση αυτή θα πρέπει να είναι τα βασικά συστατικά της ζώνης D".

2.3 Ο Μανδύας

2.3.1 Ιδιότητες και σύσταση

Ο περιδοτίτης αποτελείται κυρίως από τρία πυριτιούχα ορυκτά. Τον ολιβίνη, ένα πυκνό ορυκτό που εκτός από πυρίτιο περιέχει μαγνήσιο και σίδηρο, τον ορθοπυροξίνη. ένα παρόμοιο αλλά λιγότερο πυκνό ορυκτό, και τον κλινοπυροξίνη, που έχει επιπλέον λίγο αλουμίνιο και πάνω από 20% ασβέστιο.

Ο Μανδύας είναι το δεύτερο τμήμα του εσωτερικού φλοιού της Γης και εκτείνεται ανάμεσα στις δυο ασυνέχειες Moho και Gutenberg, δηλαδή από μέσο βάθος 40 km έως 2.200 km. Η ασυνέχεια Moho έχει πάχος μερικών χιλιομέτρων. Κάτω από τις ηπείρους εμφανίζει μια σύνθετη μορφή, ενώ κάτω από τους ωκεανούς είναι πιο απλή και διαφορετική. Η ασυνέχεια Gutenberg από την άλλη μεριά έχει τα χαρακτηριστικά μιας ασυνεχούς θερμικής ζώνης. Η μέση πυκνότητα του Μανδύα υπολογίζεται σε 4.6 gr/cm^3. Οι παραπάνω τιμές μας δείχνουν ότι ο μανδύας κατέχει ένα σημαντικό ποσοστό τόσο της μάζας όσο και του όγκου της



Η εικόνα της εξάρτησης της ταχύτητας των εγκάρσιων και διαμήκων σεισμικών κυμάτων με το βάθος μας δείχνει ότι ο εσωτερικός μανδύας έχει μιά πιό ομαλή κατανομή των υλικών του, και κυρίως ότι δεν εμφανίζονται σ' αυτόν μεταβολές φάσης, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τα "σκαλοπάτια" στα πρώτα 700 km.

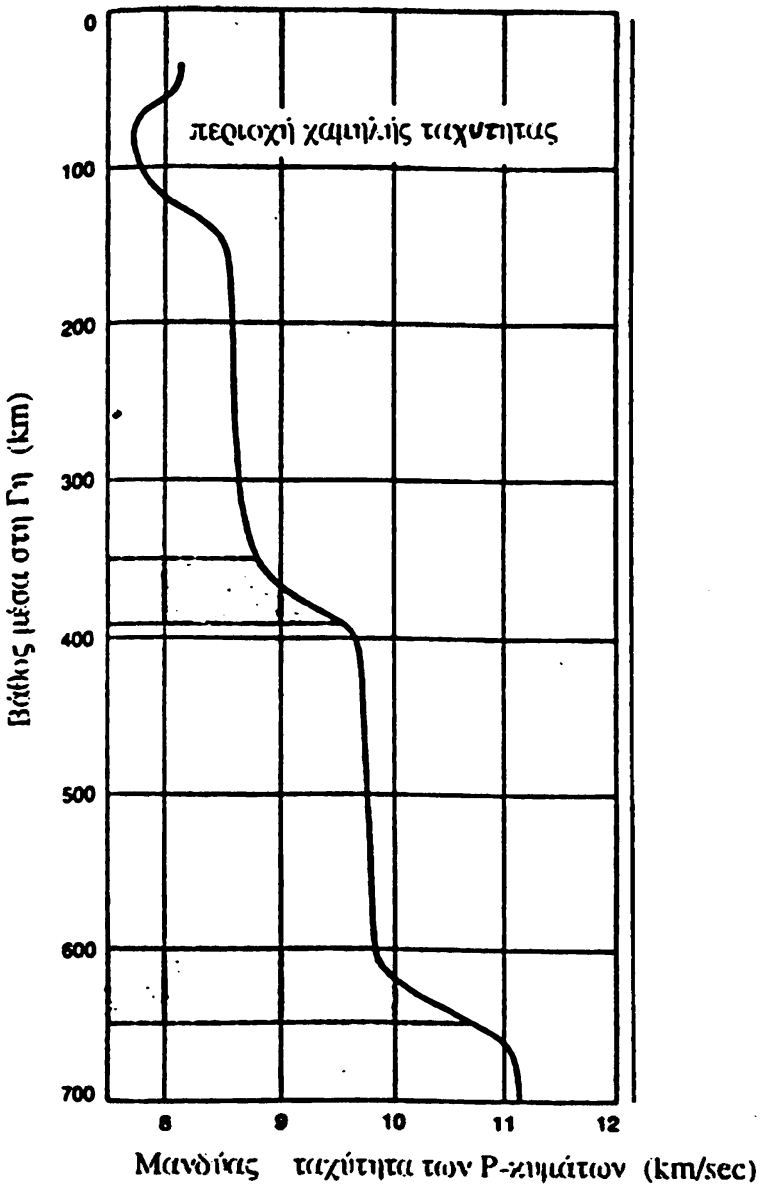
Σχήμα 22

Γης, και συγκεκριμένα κατέχει το 84% του όγκου και το 67% της μάζας της. Όπως και στην περίπτωση του πυρήνα έτσι και εδώ διαπιστώνεται ότι σε βάθος 950- 1050

km υπάρχει μια μικρή ασυνέχεια, η οποία ονομάστηκε "ασυνέχεια Repetti" και χωρίζει το μανδύα σε δυο μέρη. Εκτός των άλλων η διαχωριστική αυτή επιφάνεια δίνει σαφέστατα κύματα ανάκλασης. Τα δυο μέρη του μανδύα φέρουν τις χαρακτηριστικές ονομασίες εσωτερικός και εξωτερικός μανδύας. Το πάχος του εξωτερικού μανδύα είναι περίπου 900 km και από την ανώτερη περιοχή του είναι κυρίως η λάβα που βγαίνει από τα ηφαίστεια όταν τα τελευταία εκρήγνυνται. Πάντως είναι δύσκολο να καθορίσει κανένας τα ακριβή όρια των δυο περιοχών του μανδύα. Αναμφισβήτητα, θα πρέπει να υπάρχει μια μεταβατική ζώνη ανάμεσά τους. Ο εξωτερικός μανδύας συνεισφέρει τα 10.3% της μάζας της Γης (το 15.37% της μάζας του μανδύα), ο εσωτερικός μανδύας τα 49.2% της μάζας της Γης, δηλαδή, περίπου το μισό (το 73.4% της μάζας του μανδύα), και η μεταβατική ζώνη που χωρίζει τους δυό τους το 7.5% της μάζας της Γης (το 11.23% της μάζας του μανδύα).

Ποια είναι η χημική σύσταση του μανδύα; Ενώ για τον εξωτερικό μανδύα οι πληροφορίες μας είναι καλές, κυρίως εξετάζοντας το υλικό που αποτίθεται στις μεσοωκεάνειες ράχεις (κύταξε παρακάτω) και την ηφαιστειακή λάβα, για τον εσωτερικό μανδύα υπάρχουν πολύ λίγα στοιχεία. Αρχικά έχει κανένας την άποψη ότι ο μανδύας θα είναι μια ομογενής περιοχή του εσωτερικού της Γης, με την ίδια σχεδόν σύσταση σ' όλο του το βάθος. Η θερμική κυκλοφορία που γίνεται σ' αυτόν και η οποία μεταφέρει υλικά από μια περιοχή σε μια άλλη θα πρέπει να βοηθά στην ομογενοποίησή του αυτή. Ισχύει, όμως, πράγματι η εικόνα αυτή;

Από γεωχημικές μεθόδους και με τη βοήθεια της μέγγαινης του διαμαντιού που περιγράψαμε στην αρχή έχει βρεθεί ότι παρ' ότι τα δυο τμήματα του μανδύα φαίνεται να έχουν πράγματι παραπλήσια σύσταση, εντούτοις στο βάθος που αρχίζει ο εσωτερικός μανδύας η πίεση οδηγεί τα άτομα, που σχηματίζουν τα μόρια των ορυκτών του εξωτερικού μανδύα σε μια επαναδιάταξη, ή μ' άλλα λόγια το υλικό του εξωτερικου μανδύα υφίσταται μια αλλαγή φάσης στον εσωτερικό μανδύα. Υπάρχουν δε ενδείξεις ότι αυτό το ξεχώρισμα του μανδύα σε δυο μέρη με υλικά που το ένα προκύπτει από αλλαγή φάσης του άλλου διατηρείται εδώ και δύο



Η μεταβολή της ταχύτητας των P - κυμάτων στον εξωτερικό μανδύα δείχνει ανάγλυφα τα βάθη στα οποία παρατηρούνται μεταβολές φάσης των υλικών.

Σχήμα 23

δισεκατομμύρια χρόνια. Έτσι, φαίνεται ότι κάθε θερμική κυκλοφορία στον εσωτερικό μανδύα θα πρέπει να ξεχωρίζει από κάθε θερμική κυκλοφορία στον

εξωτερικό μανδύα ούτως ώστε να γίνεται πολύ λίγη ανάμιξη των δυο αυτών περιοχών. Υπάρχουν όμως αρκετές ασάφειες στο σημείο αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω.

Ενώ όπως είδαμε ο πυρήνας είναι σιδηρούχος, ο μανδύας είναι πετρώδης. Κύρια συστατικά του μανδύα είναι οξείδια του πυριτίου (SiO_2) και του μαγνησίου (MgO) που συμμετέχουν στο χτίσιμο μορίων με πιο πολύπλοκη δομή ή ορυκτών. Στη δεύτερη σειρά συναντάμε ορυκτά που περιέχουν οξείδια του αργιλίου, του ασβεστίου και του σιδήρου (Al_2O_3, CaO, FeO). Σε σχέση με το τελευταίο να σημειώσουμε ότι από πρόσφατες μετρήσεις της κορώνας και της φωτόσφαιρας του Ηλιου αποδείχτηκε ότι ο Ηλιος περιέχει περισσότερο σίδηρο απ' ότι είχε εκτιμηθεί αρχικά. Αυτό, μαζί και με άλλες παρατηρήσεις μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και η Γη πρέπει να περιέχει περισσότερο σίδηρο, ο οποίος εκτός από τον πυρήνα θα βρίσκεται και στο μανδύα σαν οξείδιο FeO. Εκτιμιέται ότι το οξείδιο αυτό αντιστοιχεί στο 15.7% όλης της μάζας του μανδύα, και στο 8 με 12% της μάζας του εξωτερικού μανδύα. Άρα ο εσωτερικός μανδύας θα πρέπει να περιέχει τον περισσότερο σίδηρο. Εκτιμιέται επίσης από διάφορες πηγές ότι και ο μανδύας της Σελήνης όπως και αυτός του Άρη περιέχουν το ίδιο ποσοστό FeO.

Από μελέτες των σεισμικών κυμάτων διαπιστώνουμε ότι από τη βάση του στερεού φλοιού έως και ένα βάθος 390 km το κύριο υλικό που υπάρχει είναι ο περιδοτίτης, που το κύριο ορυκτό που τον αποτελεί είναι ο ολιβίνης με χημική σύσταση $(Mg,Fe)_2\ SiO_4$. Είναι ένα πρασινωπό ορυκτό με διπλάσια σκληρότητα από το γρανίτη, το οποίο είναι διαφανές. Κατατάσσεται στους ημιπολύτιμους λίθους. Ο εξωτερικός μανδύας περιέχει επίσης εκλογίτη $(Ca,Mg)_3Al_2Si_3O_{12}$, ενστατίτη $(Mg,FE)SiO_3$ κ.λ.π. Στη δομή του ολιβίνη κάθε άτομο του πυρίτιου περιβάλλεται από τέσσερα άτομα οξυγόνου. Κάτω από τα 390 km βρίσκεται μια μεταβατική ζώνη περίπου 50 km στην οποία τα άτομα του ολιβίνη εξακολουθούν να έχουν την ίδια δομή αλλά μειώνουν τις μεταξύ τους αποστάσεις, δίνοντας το πέτρωμα του σπινέλιου. Το υλικό αυτό κυριαρχεί σε μια ζώνη που αρχίζει από τα 450 km έως τα 650 km. Από το βάθος αυτό συναντάμε μια άλλη μεταβατική ζώνη,

στην οποία τα άτομα του σπινέλιου επαναδιατάσσονται με τέτοιον τρόπο ώστε να πάρουμε το πέτρωμα περοβσκίτη. Το πέτρωμα αυτό υπάρχει από βάθος 700 km έως τα 900 km, δηλαδή στα τμήματα του εσωτερικού μανδύα. Στον περοβσκίτη κάθε άτομο του πυριτίου περιβάλλεται από έξι άτομα οξυγόνου. Εκεί συναντάμε επίσης και οξείδια του μαγνησίου. Όλες οι περιοχές χημικής ασυνέχειας του μανδύα ανιχνεύονται εύκολα από την ανάκλαση των σεισμικών κυμάτων σ' αυτές.

Για τον εσωτερικό μανδύα, τα σεισμικά δεδομένα μας δείχνουν ότι έχει οξείδια του μαγνησίου και του πυριτίου (MgO, SiO_2) και σημαντικές ποσότητες σιδήρου (FeO). Όμως, εδώ τα πράγματα γίνονται αρκετά δύσκολα ως προς την ακριβή του σύσταση, μας και τα απευθείας μηνύματα που φτάνουν από την περιοχή αυτή στην επιφάνεια της Γης είναι αρκετά λίγα αφενός, και αφετέρου έχουν "ξεπλυθεί" από τις περιοχές που βρίσκονται από πάνω. Κι' αυτό παρά το ότι ο εσωτερικός μανδύας περιέχει σχεδόν το μισό της γήινης μάζας, και επομένως η σύστασή του επηρεάζει άμεσα την τιμή της.

Ποια είναι η φυσική κατάσταση των υλικών του μανδύα; Αρχικά υπήρχαν δυο αντίθετα μοντέλα που απαντούσαν στο ερώτημα αυτό. Το πρώτο ήθελε το μανδύα σε ρευστή κατάσταση, ενώ το δεύτερο τον ήθελε σε στερεή κατάσταση. Υπέρ του δεύτερου μοντέλου ήταν το γεγονός ότι ο μανδύας διέδιδε εγκάρσια σεισμικά κύματα, πράγμα που, όπως ξέρουμε, δεν κάνουν τα ρευστά. Σήμερα ξέρουμε ότι ο μανδύας είναι στερεός αλλά μπορεί πράγματι να "ρέει" όπως ένα υγρό παρόλο που η θερμοκρασία του είναι κάτω από το σημείο τήξης των υλικών του. Η συμπεριφορά αυτή όμως είναι τελείως διαφορετική από αυτή των κρυσταλλικών στερεών στις συνηθισμένες θερμοκρασίες. Τα στερεά αυτά γενικά παραμορφώνονται ελαστικά κάτω από μικρές τάσεις και "ρέουν" μόνον όταν υπόκεινται σε τάσεις μεγαλύτερες από το σημείο θραύσης τους. Το σημείο θραύσης όμως των ορυκτών του μανδύα είναι πολύ μεγάλο, και μάλιστα πολύ πιο μεγάλο από τις τάσεις που υπολογίζουμε ότι επικρατούν στο μανδύα. Έτσι υπήρχε κάποιο πρόβλημα με μοντέλα που πρέσβευαν τη ροή των υλικών του μανδύα. Από πειραματικές εργασίες όμως που αφορούσαν στη συμπεριφορά υλικών που

βρίσκονταν κοντά στο σημείο τήξης τους, βρέθηκε ότι σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες όλα τα κρυσταλλικά στερεά ρέουν, ακόμη και σε τάσεις πολύ μικρότερες από το σημείο θραύσης τους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται "σύρσιμο" (creep). Το ιξώδες του μανδύα υπολογίζεται ότι είναι 10^{18} φορές μεγαλύτερο απ' αυτό του νερού. Αυτό εξηγεί γιατί ενώ ο μανδύας συμπεριφέρεται σαν υγρό, εντούτοις διαδίδει εγκάρσια κύματα.

Για να έχουμε μια ιδέα για το χρόνο που απαιτούν οι κινήσεις των υλικών του μανδύα, που είναι μερικά εκατοστόμετρα ανά έτος, να αναφέρουμε τα εξής. Με μια ταχύτητα 5cm/year ένα σώμα χρειάζεται 58 εκατομμύρια χρόνια για να φτάσει από τη βάση του μανδύα στην κορυφή του. Το διάστημα αυτό, όσο κι' αν μας φαίνεται μεγάλο, εντούτοις για τα γεωλογικά δεδομένα είναι σχετικά μικρό. Εάν αντιστοιχήσουμε την ηλικία της Γης στη ζωή ενός μέσου ανθρώπου (περίπου 75 χρόνια), τότε το παραπάνω διάστημα είναι γύρω στους 11.5 μήνες από τη ζωή του, δηλαδή λιγότερο και από ένα χρόνο.

Είναι προφανές βέβαια ότι όσο πλησιάζουμε προς τα ανώτερα στρώματα του μανδύα και η θερμοκρασία πέφτει, το φαινόμενο που περιγράψαμε παραπάνω θα σταματά, και από κάποιο σημείο και πάνω ο μανδύας θα συμπεριφέρεται πλήρως σαν στερεό. Από την άποψη αυτή τα στερεά ανώτερα στρώματα του μανδύα, μαζί με το στερεό φλοιό ονομάζονται λιθόσφαιρα, ενώ τα στρώματα του εξωτερικού μανδύα τα οποία βρίσκονται κάτω από τη λιθόσφαιρα και συμπεριφέρονται σαν ρευστό ονομάζονται ασθενόσφαιρα. Η ύπαρξη των δυο παραπάνω περιοχών ανιχνεύεται εύκολα με τα σεισμικά κύματα.

Η διάκριση ανέμεσα σε λιθόσφαιρα και ασθενόσφαιρα αντικατοπτρίζει τη διαφορά που έχουν αυτές οι περιοχές όχι στη χημική τους σύσταση, αλλά στη στερεότητά τους και κατ' επέκταση στη θερμοκρασία τους. Έτσι, κάτω από την ασυνέχεια Moho η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων αυξάνει με το βάθος, μέχρι περίπου τα 75-80 km. Εκεί ξαφνικά παρατηρείται μια απότομη ελάττωση της ταχύτητας με το βάθος κατά 0.1 ή 0.2 km/sec, μέχρι βάθους 150 km για τα διαμήκη και 250 km για τα εγκάρσια κύματα. Κάτω από το βάθος αυτό, η

ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων αρχίζει και πάλι να αυξάνει κανονικά με το βάθος. Το στρώμα του εξωτερικού μανδύα στο οποίο παρατηρείται η μείωση της ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων είναι η ασθενόσφαιρα. Η λιθόσφαιρα που κουβαλά πανω της ωκεανούς είναι αρκετά νέα και συγκεκριμένα έχει φτιαχτεί σε μια περίοδο που αντιπροσωπεύει μόνο το 5% της γήινης ιστορίας. Αντίθετα η λιθόσφαιρα που κουβαλά ηπείρους είναι πιο παλιά, αντιπροσωπεύει περίπου τα 3/4 της γήινης ιστορίας, και επομένως έχει μεγαλύτερη μνήμη για διάφορα σημαντικά επεισόδια που συνέβησαν σ' αυτή.

Η λιθόσφαιρα λοιπόν φαίνεται σαν να επιπλέει πάνω στο υλικό της ασθενόσφαιρας. Υπάρχει όμως εδώ μια σημαντική λεπτομέρεια. Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία, αλλά αποτελείται από έξι μεγάλες πλάκες, πάχους 80 km περίπου, και πολλές μικρότερες. Από τις πιο μεγάλες πλάκες είναι αυτή που κουβαλά πάνω της ολόκληρο τον Ειρηνικό ωκεανό, και από τις πιο μικρές αυτή που κουβαλά μόνο την Τουρκία. Μια άλλη πλάκα κουβαλά επίσης πάνω της την Αφρική, μια άλη τη Βόρειο Αμερική κ.λ.π. Γενικά, το εβαδόν των λιθοσφαιρικών πλακών κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες έως μερικές δεκάδες εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα. Αν δε δεν υπάρχουν κάποιοι πρόσθετοι παράγοντες διαταραχής, η κάθε λιθοσφαιρική πλάκα επιπλέει στην ασθενόσφαιρα μέχρι ένα βάθος, στο οποίο το βάρος της ισορροπείται από την άνωση. Στη γεωφυσική αυτό ονομάζεται ισοστατική ισορροπία.

2.3.2 Η θερμική κυκλοφορία

Όπως είπαμε στα προηγούμενα, ο πυρήνας είναι στην ουσία η φωτιά που ζεσταίνει τα στρώματα της Γης που βρίσκονται πάνω απ' αυτόν. Είναι λοιπόν προφανές ότι στο ρευστό τμήμα του μανδύα περιμένουμε να υπάρχουν θερμικά ρεύματα, όπως υπάρχουν σ' ένα οποιοδήποτε ρευστό μέσα σε μια χύτρα, την οποία

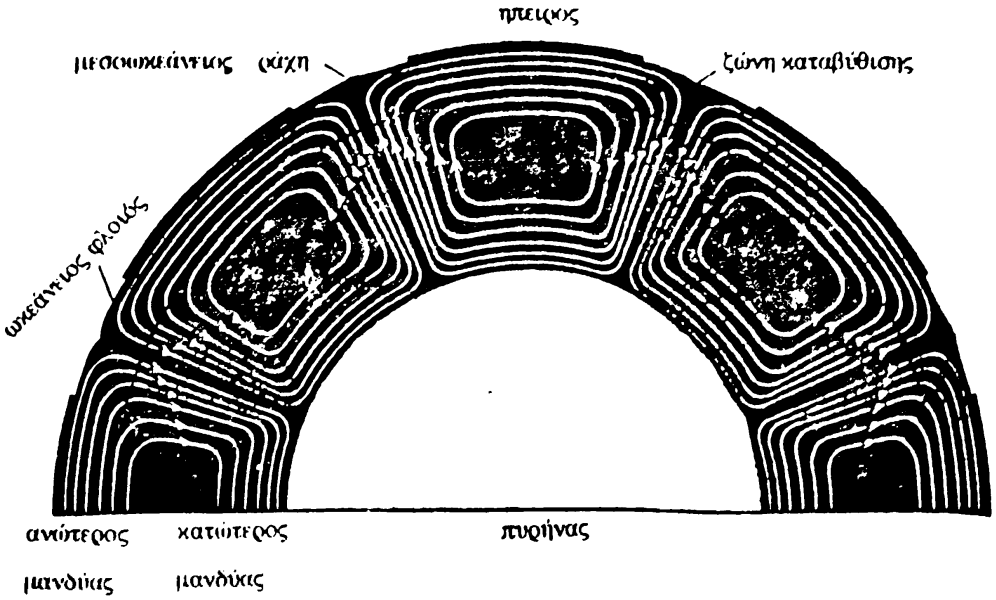
ζεσταίνουμε από κάτω. Η θερμική κυκλοφορόα του μανδύα, καθώς μεταφέρει μάζες υλικών από μιά περιοχή σε μιά άλλη, είναι πολύ πιθανόν, υποστηρίζουν μερικοί, να επηρεάζει ακόμη και την περιστροφή του πλανήτη μας.

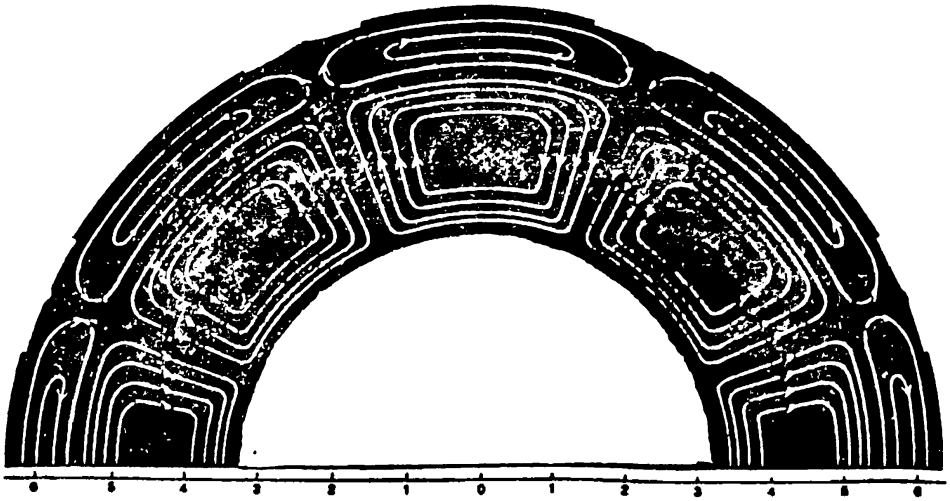
Και παραπέρα είναι λογικό να περιμένουμε κάποια αλληλεπίδραση των παραπάνω ρευμάτων με τις λιθοσφαιρικές πλάκες που επιπλέουν στην ασθενόσφαιρα. Ακριβώς για τον ίδιο λόγο που ένα κομμάτι ξύλο το οποίο επιπλέει σε ένα ρευστό που θερμαίνεται από κάτω, μετακινείται από τα θερμικά ρεύματα που δημιουργούνται. Και όντως, τα πράγματα συμβαίνουν έτσι ακριβώς. Λόγω θερμικών ρευμάτων στην ασθενόσφαιρα οι λιθοσφαιρικές πλάκες μετακινούνται. Η μεγαλύτερη ταχύτητα μιας λιθοσφαιρικής πλάκας μπορεί να φτάσει μέχρι τα 20 cm ανά έτος, ενώ η πιο μικρή ταχύτητα είναι της τάξης των 5 cm ανά έτος. Ένας άνθρωπος που κινείται με ταχύτητα 20 cm ανά έτος, θα χρειαζόταν 80 χρόνια (δηλαδή μια ολόκληρη ζωή) για να διανύσει μια απόσταση μόλις 16 m. Φανταστείτε επίσης ότι η άκρη του μικρού δείχτη ενός κοινού ρολογιού τοίχου έχει μια ταχύτητα γύρω στα 5cm/ώρα. Η κίνηση, βέβαια, αυτού του δείχτη περνά απαρατήρητη για μικρά χρονικά διαστήματα. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες κινούνται με μια ταχύτητα που είναι 10.000 φορές μικρότερη από την παραπάνω. Αρχικά, ακριβώς επειδή εθεωρείτο ότι ο μανδύας δεν ρέει, η τεκτονική θεωρία της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών δεν μπορούσε να γίνει πιστευτή όταν προτάθηκε, μιας και το μεγάλο ερώτημα ήταν, ποιος μετακινεί τις ηπείρους;

Ας έλθουμε τώρα να συζητήσουμε με κάποιες λεπτομέρειες όλα τα παραπάνω, τα οποία όπως θα δούμε είναι σημαντικής σπουδαιότητας για τη σεισμολογία, αρχίζοντας από τα θερμικά ρεύματα του μανδύα. Για την κυκλοφορία των ρευμάτων αυτών υπάρχουν δυο δυνατότητες. Ή ολόκληρος ο μανδύας έχει μια κυκλοφορία σαν ένα ενιαίο τμήμα ή έχει διαφορετικές κυκλοφορίες ανά περιοχές. Το ερώτημα αυτό, όσο απλό κι' αν είναι, άλλο τόσο είναι δύσκολο να απαντηθεί. Οι περισσότερες ενδείξεις, πάντως, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μάλλον υπάρχουν δυο σχετικά ανεξάρτητες κυκλοφορίες, μια για τον εξωτερικό και μια για τον εσωτερικό μανδύα. Αυτό, βέβαια, δεν σημαίνει ότι

δεν αναμένεται κάποιου είδους αλληλεπίδραση ανάμεσα στις δυο αυτές κυκλοφορίες. Για παράδειγμα, παρ' ότι οι δυο κυκλοφορίες είναι χωρισμένες θα μπορούσε η γεωμετρία της μιας να καθορίζει τη γεωμετρία της άλλης. Και βέβαια, περιμένουμε μια κάποια αλληλεπίδραση και ανάμεσα στην κυκλοφορία του πυρήνα και του εσωτερικού μανδύα. Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα υπάρχει στην κυκλοφορία του εσωτερικού μανδύα. Όχι μόνο δεν γνωρίζουμε πολλά στοιχεία γύρω από αυτή, αλλά ακόμη παραπέρα, όπως είπαμε, ούτε ποιας μορφής είναι η αλληλεπίδρασή της με εκείνη του εξωτερικού μανδύα. Για τα θερμικά ρεύματα του εξωτερικού μανδύα πάντως τα πράγματα είναι αρκετά καλύτερα.

Για την κατανόηση της κυκλοφορίας των ρευμάτων αυτών, έχουν γίνει (και εξακολουθούν να γίνονται) σημαντικές προσπάθειες. Κυρίως γίνονται πειράματα στα οποία μελετιέται η κυκλοφορία ενός υλικού όμοιου μ' αυτό του μανδύα σε μεγάλες πιέσεις, το οποίο θερμαίνεται από κάτω. Σε ευρεία χρήση είναι επίσης και προγράμματα υπολογιστών που προσπαθούν να αναπαράγουν την παραπάνω κυκλοφορία, Μέχρι στιγμής οι σχετικές προσπάθειες έχουν δώσει κάποια αποτελέσματα σε δυο διαστάσεις, και υπάρχει αρκετή αισιοδοξία ότι στο μέλλον η όλη εικόνα θα γίνει αρκετά πιο σαφής. Η βασική εικόνα που αποκομίζει πάντως κανένας απ' όλα τα παραπάνω, είναι ότι η κυκλοφορία των ρευμάτων του εξωτερικού μανδύα είναι και πολύπλοκη και μεταβάλεται με το χρόνο. Φαίνεται δε ότι υπάρχουν δυο διαφορετικές κυκλοφορίες. Μια μικρής κλίμακας που καλύπτει ένα μήκος 1500 km περίπου κατά την οριζόντια και μια μεγάλης κλίμακας που επιστρέφει υλικό από μια τάφρο σε μια ράχη, δηλαδή, αντιστοιχεί στις διαστάσεις μιας λιθοσφαιρικής πλάκας. Η τάφρος είναι η περιοχή από την οποία κατέρχονατυι υλικά προς το εσωτερικό του μανδύα, και η ράχη είναι η περιοχή στην οποίαν φτάνοιν υλικά από το εσωτερικό του μανδύα.Το οριζόντιο τμήμα αυτής της κυκλοροφίας μπορεί να έχει μήκος επομένως μέχρι και 10.000 km. Η μεγάλης έκτασης αυτή κυκλοφορία επομένως ανακατεύει όλον τον εξωτερικό μανδύα, φέρνοντας υλικά προς τα πάνω από το όριό του με τον εσωτερικό.





Σε σχέση με τη θερμική κυκλοφορία του μανδύα υπάρχουν δυό δυνατότητες. Είτε ολόκληρος ο μανδύας έχει μιά κυκλοφορία, είτε η κυκλοφορία του εσωτερικού μανδύα είναι ανεξάρτητη από αυτή του εξωτερικού μανδύα.

Σχήμα 24

μανδύα, και πηγαίνοντας προς τα κάτω υλικά που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια της Γης. Όλες οι βαθμίδες κυκλοφορίας φαίνεται να φτάνουν μέχρι βάθος 700 km, αν και στο σημείο αυτό υπάρχουν αρκετά ερωτηματικά

Μια σημαντική μέθοδος η οποία μας δίνει αρκετές πληροφορίες για την ακριβή εικόνα των θερμικών ρευμάτων του μανδύα ακόμη και αυτών που είναι σχετικά μικρά είναι αυτή που μετρά τις ανωμαλίες του πεδίου βαρύτητας, δηλαδή τις διαφορές του πεδίου βαρύτητας από τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές του. Οι θεωρητικά αναμενόμενες τιμές είναι αυτές που υπολογίζονται για ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Το ελλειψοειδές εκ περιστροφής είναι ένα αρκετά συμμετρικό στερεό και εάν δεν υπήρχαν βαρυτικές ανωμαλίες τέτοιο θα ήταν το σχήμα των νερών της θάλασσας. Όμως η ύπαρξη των τελευταίων οδηγεί τα θαλασσινά νερά να παίρνουν ένα σχήμα που διαφέρει λίγο από το ελλειψοειδές εκ περιστροφής, και το οποίο ονομάζουμε γεωειδές. Η διαφορά ανάμεσα στο γεωειδές και το ελλειψοειδές σε ένα σημείο αντιστοιχεί σ' αυτό που ονομάζουμε βαρυτική ανωμαλία στο σημείο αυτό. Όπου το γεωειδές είναι πιο ψηλό από το ελλειψοειδές, δηλαδή έχει περισσότερη συσσωρευμένη ύλη σε μια περιοχή, εκεί υπάρχει μια θετική βαρυτική ανωμαλία, δηλαδή το πεδίο βαρύτητας που μετρούν τα όργανά μας είναι μεγαλύτερο απ' αυτό που υπολογίζουμε θεωρητικά. Αντίθετα, όπου το γεωειδές είναι πιο χαμηλό από το ελλειψοειδές, εκεί καταγράφουμε μια αρνητική ανωμαλία. Αν μείνουμε στις περιοχές που καλύπτονται από θάλασσα, μιας και σ' αυτές θα εφαρμοστεί η μέθοδος που αναφέραμε παραπάνω, οι βαρυτικές ανωμαλίες μπορεί να οφείλονται σε τοπογραφικές ανωμαλίες του βυθού, δηλαδή σε υποθαλάσσιες οροσειρές (οι θετικές) και σε υποθαλάσσια βυθίσματα (οι αρνητικές). Οι βαρυτικές αυτές ανωμαλίες είναι εύκολο να ανιχνευτούν, αλλά δεν είναι αυτές που μας ενδιαφέρουν εδώ. Οι βαρυτικές ανωμαλίες που μας ενδιαφέρουν αντίθετα είναι αυτές που σχετίζονται με τα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα του μανδύα. Αποδεικνύεται δε ότι πάνω από ένα ανερχόμενο ρεύμα υπάρχει μια θετική ανωμαλία, και το αντίθετο πάνω από ένα κατερχόμενο ρεύμα.

Να σημειώσουμε ότι σε περιοχές ανερχόμενου ρεύματος έχουμε μια μικρή ώθηση της γήινης επιφάνειας προς τα πάνω, και το αντίθετο σε περιοχές κατερχόμενου ρεύματος. Επίσης, οι λιθοσφαιρικές πλάκες είναι αρκετά λεπτές οι ίδιες για να δημιουργούν κάποιο παρατηρήσιμο αποτέλεσμα στο πεδίο βαρύτητας. Έτσι, με βάση τα παραπάνω, αν είχαμε τη δυνατότητα να αποκτήσουμε μια λεπτομερή χαρτογράφηση του πεδίου βαρύτητας, τότε θα αποκτούσαμε και μια καλή εικόνα για την κυκλοφορία των θερμικών ρευμάτων του μανδύα. Η χαρτογράφηση αυτή αποδεικνύεται ότι μπορεί να γίνει εύκολα στις ωκεάνειες περιοχές, όπου μπορεί σχετικά εύκολα να βρεθεί ο "θόρυβος" των βαρυτικών ανωμαλιών που οφείλεται σε άλλες πηγές και κύρια σε υποθαλάσσιες οροσειρές και πεδιάδες.

Αν και περιμένουμε να υπάρχουν τέτοιες περιοχές θετικών βαρυτικών ανωμαλιών και στις ηπείρους, εντούτοις η ακριβής ανίχνευσή τους εκεί είναι πολύ δύσκολη. Πιο συγκεκριμένα, εδώ είναι πολύ πιο δύσκολο να αφαιρεθεί ο θόρυβος όλων των άλλων βαρυτικών ανωμαλιών που οφείλονται σε άλλες αιτίες, και να απομονωθούν μόνο οι ανωμαλίες που μας ενδιαφέρουν. Μέχρι στιγμής η yellow stone caldera είναι μια από τις λίγες ηφαιστειακές περιοχές στις ηπείρους στην οποία υπάρχει θετική βαρυτική ανωμαλία που οφείλεται σε μια ζεστή ανερχόμενη μάζα υλικών του μανδύα.

Στην αρχή φαίνεται ότι η βαρυτική ανωμαλία πάνω από μια περιοχή ζεστής ανερχόμενης ύλης θα είναι αρνητική, μιας και η πυκνότητα της ύλης αυτής είναι μικρότερη από εκείνη των κρύων υλικών που την περιβάλλουν. Η άνοδος όμως της επιφάνειας που επιφέρει το ανερχόμενο ρεύμα δημιουργεί μια θετική ανωμαλία, λόγω της πρόσθετης μάζας που τελικά υπάρχει εκεί. Αν και οι δυο συνεισφορές φαίνεται ότι θα εξουδετερώσουν η μια την άλλη, εντούτοις η θετική συνεισφορά από την επιφανειακή παραμόρφωση είναι κατά τι μεγαλύτερη από την αρνητική συνεισφορά της ζεστής ανερχόμενης ύλης. Έτσι πάνω από ένα ανερχόμενο ρεύμα του μανδύα περιμένουμε τελικά να βρούμε μια θετική βαρυτική ανωμαλία και αντίθετα μια αρνητική βαρυτική ανωμαλία πάνω από μια περιοχή

που καταβυθίζεται. Αυτό σημαίνει ότι σε έναν ωκεανό έχουμε ανύψωση του νερού πάνω από ένα ανερχόμενο ρεύμα και μια καταβύθισή του πάνω από ένα κατερχόμενο ρεύμα. Κι' αυτό γιατί όπου υπάρχει θετική ανωμαλία, δηλαδή μεγάλη βαρυτική έλξη, συγκεντρώνεται πολύ νερό. Σύμφωνα με κάποιες χοντρικές πρώτες εκτιμήσεις η υψομετρική διαφορά ανάμεσα σε δυο τέτοιες περιοχές που απέχουν 2.000 km θα μπορούσε να φτάσει και τα 20 m. Αυτή η υψομετρική διαφορά είναι εύκολο να ανιχνευτεί από έναν τεχνητό δορυφόρο με τη μέθοδο του radar. Πράγματι, το 1978 εκτοξεύτηκαν δυο τεχνητοί δορυφόροι οι Geos 3 και Seasat. Ειδικά ο δεύτερος δορυφόρος είχε όργανα πολύ μεγάλης ακρίβειας, τα οποία μπορούσαν να μετρήσουν το ύψος της θάλασσας με ακρίβεια 5 έως 10 cm. Δστυχώς όμως τα όργανα αυτά δούλεψαν μόνο για τρεις μήνες από τον Ιούνιο έως το Σεπτέμβρη του 1978, και μετά χάλασαν. Έστω και στο μικρό αυτό διάστημα όμως πρόφτασαν και έδωσαν κάποιες σημαντικές πληροφορίες. Έτσι, επιβεβαίωσαν την ύπαρξη θετικών και αρνητικών βαρυτικών ανωμαλιών πάνω από ανερχόμενα και κατερχόμενα θερμικά ρεύματα αντίστοιχα. Παραπέρα, επιβεβαίωσαν ότι η γενικά πολύπλοκη κυκλοφορία των θερμικών ρευμάτων αναλύεται σε δυο βασικά κυκλοφορίες, όπως αναφέραμε και προηγούμενα. Υπάρχει πάντως αρκετή δουλειά για το μέλλον και κυρίως αναμένονται με ενδιαφέρον νέες μετρήσεις των θετικών και αρνητικών βαρυτικών ανωμαλιών.

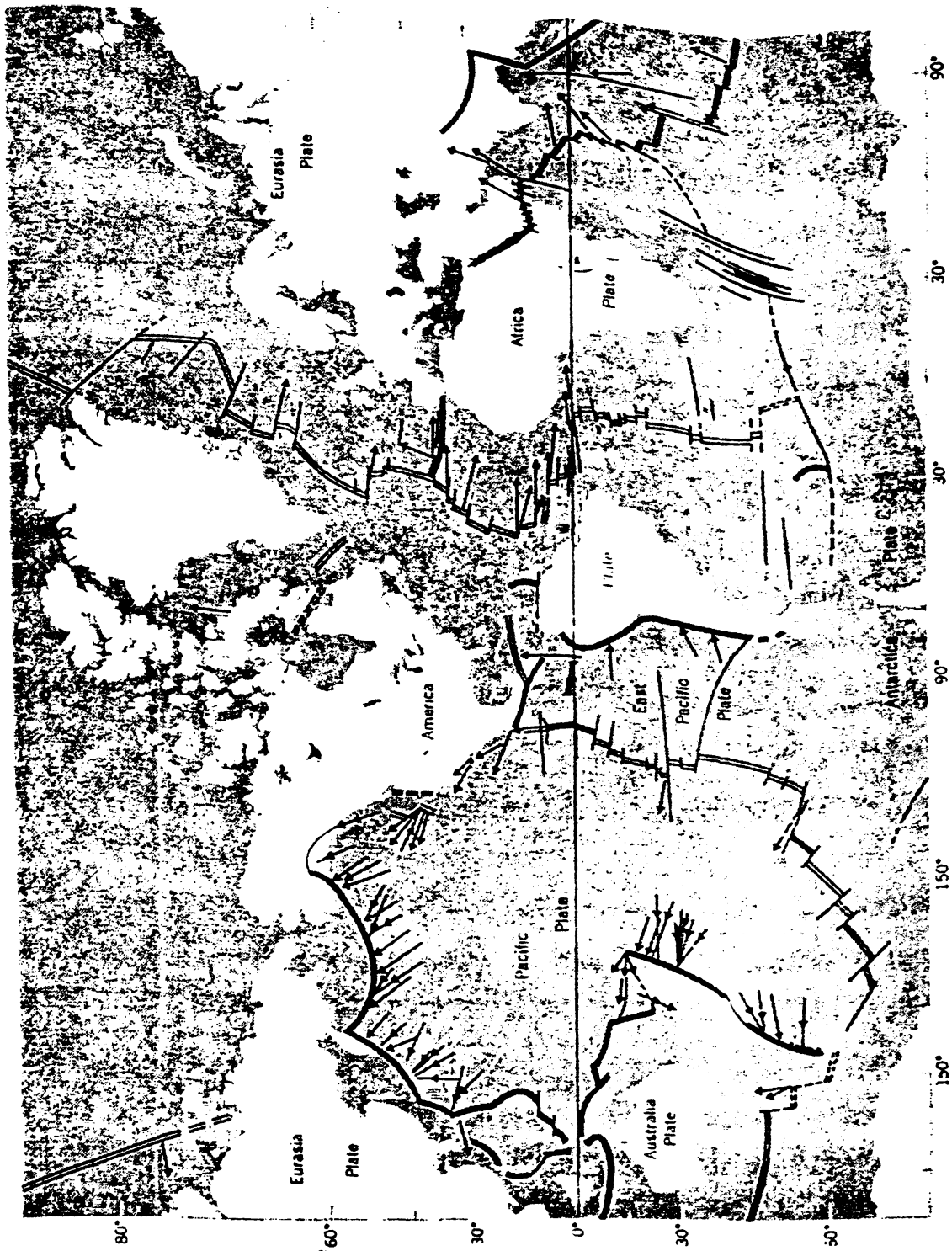
Όπως έχουμε 'πεί στα προηγούμενα, τα θερμικά ρεύματα του μανδύα δημιουργούνται επειδή ο πυρήνας ζεσταίνει το μανδύα. Εκτιμιέται ότι ο πυρήνας διοχετεύει προς το μανδύα θερμότητα με ρυθμό $20*10^6$ MWatts. Από την άλλη μεριά ένα πολύ σημαντικό ποσό θερμότητας χάνεται με τα ανοδικά ρεύματα, και κυρίως στις λεγόμενες μεσοωκεάνειες ράχεις, δηλαδή στις υποθαλάσσιες περιοχές όπου εναποτίθεται ζεστό υλικό από το μανδύα. Η θερμότητα αυτή υπλογίζεται ότι χάνεται με άν ρυθμό $40*10^6$ MWatts. Οι αριθμοί αυτοί μας δείχνουν ότι μ' αυτόν τον τρόπο η Γη κρυώνει με την πάροδο του χρόνου. Υπάρχουν δε όντως πολλές ενδείξεις ότι αυτό είναι αληθινό. Πράγματι, με γεωχημικές μεθόδους υπολογίζεται ότι η ηφαιστειογενής λάβα που έχει εκλυθεί από ηφαίστεια κατά το πρώτο μισό της

γήινης ιστορίας ήταν κατά 200 °C πιο ζεστή από κάθε μορφής λάβα που εκλύεται τη σημερινή εποχή. Το ότι το εσωτερικό της Γης ήταν πιο ζεστό τα πρώτα χρόνια οφείλεται βέβαια και σε άλλους λόγους. Τότε υπήρχαν πιο πολλά ραδιενεργά στοιχεία (κυρίως φθόριο, ουράνιο, κάλιο) και υπήρχε πιο πολύ πρωταρχική θερμότητα από τη βαρυτική συρρίκνωση. Να σημειωθεί δε ότι ο ρυθμός με τον οποίο χάνεται θερμότητα είναι σχετικά μικρός, μιας και ο μανδύας είναι κακός αγωγός της θερμότητας, και το χάσιμο γίνεται κυρίως μόνο από τα ανοδικά ρεύματα και όχι από αγωγή. Τέλος να σημειώσουμε ότι το μοντέλο που πρεσβεύει την ύπαρξη διπλής κυκλοφορίας στο μανδύα αποδεικνύει ότι μ' αυτόν τον τρόπο χάνεται ένα ακόμη πιο μικρό ποσό θερμότητας απ' ότι αν υπήρχε μια μόνη κυκλοφορία. Κι' αυτό γιατί από τις δυο κυκλοφορίες μόνο η μια οδηγεί ζεστά υλικά μέχρι τις μεσοωκεάνειες ράχεις, όπου και ψύχονται.

2.3.3. Η μετακίνηση των ηπείρων

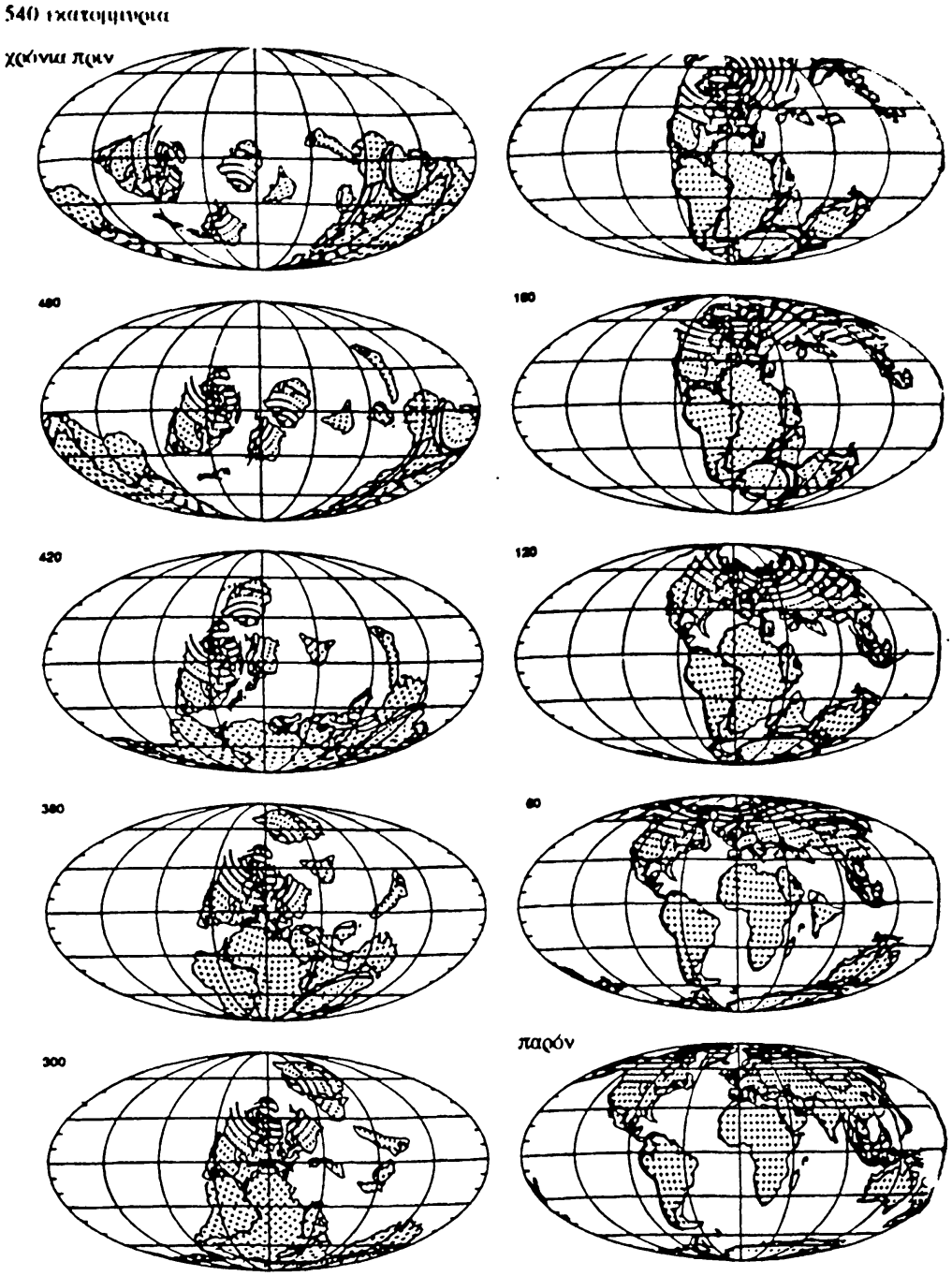
Οι λιθοσφαιρικές πλάκες, κάτω από την επίδραση των θερμικών ρευμάτων της ασθενόσφαιρας κινούνται, όπως είπαμε. Οι κινήσεις αυτές αντιστοιχούν όμως στη συνισταμένη δύναμη που δέχονται οι πλάκες από τα θερμικά ρεύματα στη βάση τους και στα όριά τους, και έτσι, αν και σήμερα γνωρίζουμε με ακρίβεια τις κινήσεις των πλακών, εντούτοις είναι δύσκολο να βρούμε μόνο από τις κινήσεις αυτές τον ακριβή τρόπο κυκλοφορίας των ασθενοσφαιρικών ρευμάτων. Από τη στιγμή βέβαια που οι πλάκες κινούνται είναι αναπόφευκτο εφόσον οι ταχύτητές τους είναι διαφορετικές να υπάρχουν σχετικές κινήσεις ανάμεσά τους.

Επειδή ακριβώς υπάρχει μια συνολική κίνηση των πλακών, είναι δύσκολο να αποφανθεί κάποιος αν σε δυο πλάκες, οι οποίες, για παράδειγμα, αποκλίνουν, έχουμε κίνηση και των δυο πλακών ή η μια ακινητεί και η άλλη απομακρύνεται απ' αυτή. Κάτω από ορισμένες συνθήκες τα θερμικά ρεύματα του μανδύα μπορεί να έχουν μια τέτοια κατανομή ώστε πράγματι να κρατούν ακίνητη μια πλάκα.



Χάρτης των κυριοτέρων τεκτονικών πλακών του πλανήτη μας. Στα όρια των πλακών υπάρχουν ράχεις και τάφροι. Οι πρώτες δείχνονται με διπλή γραμμή και οι δεύτερες με απλή γραμμή. Τα βέλη δείχνουν τη διεύθυνση κίνησης των πλακών.

Σχήμα 25



Η μετακίνηση των ηπείρων, η εμφάνιση νέων ξηρών και η καταβύθιση άλλων άλλαζε συνεχώς το πρόσωπο του πλανήτη μας. Εδώ δείχνεται αυτή η αλλαγή με βάση τα στοιχεία που υπάρχουν, αρχίζοντας από 540 εκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα και ανά διαστήματα 60 εκατομμυρίων χρόνων. Οι χάρτες έχουν εκπονηθεί στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο.

Σχήμα 26

Υπάρχουν ενδείξεις ότι η Αφρικανική πλάκα είναι μιά τέτοια ακίνητη πλάκα, τα τελευταία 30 εκ. χρόνια. Γενικά, όμως, το θέμα αυτό είναι σχετικά δύσκολο.

Οι μετακινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, είναι αναπόφευκτο να επιφέρουν και μετακινήσεις του ηπειρωτικού φλοιού, που άλλωστε τον κουβαλούν στη ράχη τους. Έτσι, όσο κι' αν από πρώτη άποψη φαντάζει παράξενο, οι ήπειροι μετατοπίζονται. Η ταχύτητα της μετατόπισής τους βέβαια είναι μικρή, μερικά cm το έτος, αλλά υπαρκτή. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι η κατανομή των ηπείρων τα παλιότερα χρόνια ήταν τελείως διαφορετική από τη σημερινή, που κι' αυτή προβλέπεται να αλλάξει σημαντικά στο μέλλον. Ήπειροι που σήμερα είναι χωρισμένες με ωκεανούς ήταν κάποτε πολύ κοντά η μια στην άλλη, ή και ενωμένες, και, αντίθετα, ήπειροι που σήμερα γειτονεύουν ή και αποτελούν ένα ενιαίο κομμάτι ξηράς, ήταν κάποτε χωρισμένες με μεγάλους ωκεανούς. Η γήινη επιφάνεια, λοιπόν, έχει μια συνεχώς μεταβαλόμενη κατανομή

Υπάρχουν ενδείξεις ότι η Αφρικανική πλάκα είναι μιά τέτοια ακίνητη πλάκα, τα τελευταία 30 εκ. χρόνια. Γενικά, όμως, το θέμα αυτό είναι σχετικά δύσκολο.

Οι μετακινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, είναι αναπόφευκτο να επιφέρουν και μετακινήσεις του ηπειρωτικού φλοιού, που άλλωστε τον κουβαλούν στη ράχη τους. Έτσι, όσο κι' αν από πρώτη άποψη φαντάζει παράξενο, οι ήπειροι μετατοπίζονται. Η ταχύτητα της μετατόπισής τους βέβαια είναι μικρή, μερικά cm το έτος, αλλά υπαρκτή. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι η κατανομή των ηπείρων τα παλιότερα χρόνια ήταν τελείως διαφορετική από τη σημερινή, που κι' αυτή προβλέπεται να αλλάξει σημαντικά στο μέλλον. Ήπειροι που σήμερα είναι χωρισμένες με ωκεανούς ήταν κάποτε πολύ κοντά η μια στην άλλη, ή και ενωμένες, και, αντίθετα, ήπειροι που σήμερα γειτονεύουν ή και αποτελούν ένα ενιαίο κομμάτι ξηράς, ήταν κάποτε χωρισμένες με μεγάλους ωκεανούς. Η γήινη επιφάνεια, λοιπόν, έχει μια συνεχώς μεταβαλόμενη κατανομή

ωκεανών και ξηράς. Τα πολύ παλιά χρόνια, μάλιστα, και συγκεκριμένα πριν από 150 εκατομμύρια χρόνια περίπου, πιστεύουμε ότι όλοι οι ήπειροι ήταν ενωμένες μεταξύ τους, σχηματίζοντας μια και μόνη υπερήπειρο, την Παγγαία. Αντίστοιχα,

την ίδια εποχή, υπήρχε μόνον ένας ωκεανός η Πανθάλασσα. Σήμερα, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια τις σχετικές κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών για τα τελευταία 150 εκατομμύρια χρόνια, και έτσι να αναπαράγουμε τον κατακερματισμό της Πανγαίας σε άλλες μικρότερες ηπείρους, όπως και τις κινήσεις των ηπείρων αυτών.

Δεν μπορεί βέβαια κανένας παρά να υποθέσει ότι ο σχηματισμός μιας τόσο μεγάλης ηπειρωτικής μάζας, όπως η Πανγαία, επέφερε κάποια αναστάτωση στη θερμική ροή του εσωτερικού της Γης. Η συνένωση όλων των ηπειρωτικών μαζών σε μία, έδρασε σαν ένα τεράστιο καπάκι που κύρια εμπόδιζε την κυκλοφορία των ανοδικών ρευμάτων. Ο κατακερματισμός, λοιπόν, της Πανγαίας δεν πρέπει να ήταν τυχαίος αλλά αποτέλεσμα δυναμικών διαδικασιών. Ίσως δε τη στιγμή αυτή του κατακερματισμού, πριν από 150 εκ. χρόνια, καθορίστηκαν και οι αρχικές συνθήκες κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών, που βρίσκονται ακόμη και σήμερα ενσωματωμένες στο ταξίδι τους.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα σε σχέση με τις μετακινήσεις των ηπείρων είναι και το εξής. Η μετακίνηση των ηπείρων είναι προφανές ότι επιφέρει μια αλλαγή στη ροπή αδράνειας της Γης γύρω από τον άξονά της, και επομένως και της γωνιακής της ταχύτητας περιστροφής. Ακριβείς όμως εκτιμήσεις για τα πρακτικά αποτελέσματα αυτού του στοιχείου είναι δύσκολο να γίνουν. Πολύ πιθανόν να επιφέρουν μετατόπιση και του άξονα περιστροφής, όπως και μεταβολή του γήινου μαγνητικού πεδίου. Πράγματι για λόγους που θα αναφέρουμε αργότερα, αλλαγές στα στοιχεία που καθορίζουν την κατάσταση περιστροφής της Γης (άξονας περιστροφής, γωνιακή ταχύτητα) δεν μεταβιβάζονται αμέσως στον υγρό εξωτερικό πυρήνα. Για τον ίδιο λόγο που αν περιστρέψουμε ένα δοχείο με νερό, το νερό δεν αποκτά αμέσως τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δοχείου. Σίγουρα, όμως, τελικά θα λάβει και ο εξωτερικός πυρήνας γνώση των αλλαγών, και επομένως είναι λογικό να υποθέσει κανένας ότι οι μετακινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών θα επηρεάζουν την τροχιά της θερμικής ροής της εσωτερικής αυτής περιοχής της Γης και άρα και τις μαγνητικές ιδιότητες που πηγάζουν από εκεί.

Η ιδέα ότι οι σχετικές θέσεις των ηπείρων στον πλανήτη μας δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται συνεχώς σιγόκαιγε ήδη από την αρχή του αιώνα στο μυαλό μερικών γεωλόγων και γεωφυσικών, φάνταζε όμως αρκετά παράλογη και "αφύσικη". Πρώτος ο Γερμανός μετεωρολόγος Alfred Wegener πρότεινε το 1920 ότι η σημερινή κατανομή των ηπειρωτικών μαζών είχε προέλθει από τη διάλυση μιας υπερηπείρου, που υπήρξε 180 με 200 εκατομμύρια χρόνια πριν. Έδινε μάλιστα και τον τρόπο με τον οποίο οι σημερινοί ήπειροι είχαν ενωθεί μεταξύ τους για το σχηματισμό αυτής της υπερηπείρου. Ειδικότερα, το ταίριασμα της Αφρικής και της Ν. Αμερικής ήταν και αινιγματικό και προκλητικό για να περάσει απαρατήρητο. Παραπέρα, υπήρχαν σε πολλές ηπείρους που σήμερα χωρίζονται με χιλιάδες χιλιόμετρα κοινά γνωρίσματα στη δομή και το είδος των πετρωμάτων τους, που δεν εύρισκε άλλη εξήγηση πέρα από το ότι κάποτε οι ήπειροι αυτές ήταν ενωμένες και τα πετρώματα αυτά είχαν κοινή προέλευση. Για παράδειγμα, τα Απαλλάχια όρη της Αμερικής και τα Μαυριτανικά όρη της Αφρικής μοιάζουν σαν δίδυμα αδέλφια, και το ένα είναι το κατοπτρικό είδωλο του άλλου. Άλλα στοιχεία που συνηγορούσαν υπέρ της άποψης της μετατόπισης των ηπείρων ήταν το γεγονός ότι σε ηπείρους, όπως για παράδειγμα η Αφρική, βρέθηκαν ίχνη από παγετώνες, πράγμα παράξενο για τη σημερινή γεωγραφική της θέση. Ότι τα παλιότερα χρόνια η Αφρική ήταν σε διαφορετικό σημείο διαπιστώνεται και από το μαγνητικό πεδίο παλιών ορυκτών και λάβας. Το τελευταίο αυτό έδειχνε ότι την εποχή του σχηματισμού τους, τόσο τα πετρώματα όσο και η λάβα, δεν βρισκόντουσαν στο σημερινό γεωγραφικό τους στίγμα. Παρ' όλ' αυτά, η πρόταση του Wegener πολύ λίγο προσέχτηκε. Ήταν πολύ επαναστατική για να γίνει αποδεκτή. Έτσι, μόλις πριν από 30 χρόνια, στις αρχές της δεκαετίας του '60, η κατάσταση άρχιζε να ξεκαθαρίζει και μπροστά στα καινούρια στοιχεία που είχαν ανακαλυφθεί η θεωρία της μετακίνησης των ηπείρων έγινε αποδεκτή απ' όλη την επιστημονική κοινότητα.

Θα πρέπει να σημειώσουμε, σε σχέση με το μαγνητισμό παλιών ορυκτών, ότι εάν η λάβα ή το ίζημα αποτέθηκαν κοντά στον Ισημερινό, τότε το άνυσμα που

καθορίζει τη μαγνήτισή τους είναι σχεδόν οριζόντιο, ενώ εάν αποτέθηκαν κοντά στους πόλους το άνυσμα αυτό έχει μεγάλη κλίση. Είναι, βέβαια πιθανό το πέτρωμα που εξετάζεται να έχει ξαναθερμανθεί από την εποχή της απόθεσής του. Στην περίπτωση αυτή χάνεται η πληροφορία που κουβαλούσε, πράγμα που είναι ανάλογο με το μηδενισμό της ώρας ενός ρολογιού και το ρολόϊ αρχίζει να ξαναχτυπά από τη στιγμή της νέας επαναθέρμανσης.

Το πιο καθοριστικό από τα νέα στοιχεία που έριξαν το βάρος τους υπέρ της θεωρίας της μετακίνησης των ηπείρων ήταν η ηλικία του γήινου φλοιού στις μεσοωκεάνειες ράχεις. Η θεωρία της μετακίνησης των ηπείρων πρέσβευε ότι ο φλοιός αυτός είναι σχετικά νέος, σε σχέση με τον ηπειρωτικό φλοιό, μιας και δημιουργείται συνεχώς. Και πράγματι η ηλικία του ωκεάνειου φλοιού βρέθηκε να είναι μόλις 200 εκατομμυρίων χρόνων, ενώ η ηλικία του ηπειρωτικού φλοιού είναι πάνω από 2.5 δισεκατομμύρια χρόνια. Ο πιο παλιός ωκεάνειος φλοιός, ηλικίας 160 έως 170 εκατομμυρίων χρόνων, βρίσκεται στη λεκάνη Pigafetta, ανατολικά των νησιών Mariana.

Δεν θα πρέπει, πάντως, να μας διαφεύγει ότι στην ουσία, η τεκτονική θεωρία για την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών έχει τα χαρακτηριστικά περισσότερο μιας περιγραφικής και λιγότερο μιας φυσικής θεωρίας. Κι' αυτό γιατί μια πλήρης φυσική θεωρία θα πρέπει να είναι σε θέση να μας εξηγήσει με κάποια σχετική ακρίβεια τη δυναμική του εσωτερικού της Γης, τη σχέση του με το στερεό φλοιό, γιατί η Γη παρουσιάζει μια τεκτονική δράση η οποία απουσιάζει από τους άλλους πλανήτες, τι είναι εκείνο που αλλάζει τη διεύθυνση κίνησης των πλακών σε διάστημα εκατομμυρίων χρόνων κ.λ.π. Από τη στιγμή που θα είμαστε σε θέση ξεκινώντας από κάποιες βασικές αρχές και κάποιες αρχικές συνθήκες να εξηγήσουμε τη σημερινή μορφή του πλανήτη μας, θα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η περιγραφική μας θεωρία έγινε και φυσική. Φαίνεται, όμως, ότι ο δρόμος θα είναι πολύ μακρύς μέχρι να καταφέρουμε κάτι τέτοιο.

Αυτό, όμως, θα πρέπει κάποτε να γίνει, γιατί είναι προφανές ότι η τεκτονική δράση του πλανήτη μας, δηλαδή οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, είναι ένα

από τα πιο σημαντικά φαινόμενα που συμβαίνουν σ' αυτόν. Και όπως είπαμε, κανένας άλλος πλανήτης δεν εμφανίζει αυτήν την έντονη τεκτονική δράση. Αν και σήμερα κάποια ζητήματα γύρω από την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών έχουν λίγο πολύ ξεκαθαρίσει, εντούτοις υπάρχουν ακόμη σημαντικά ερωτήματα που μένουν αναπάντητα. Για παράδειγμα. Πότε η ζεστή Γη άρχισε να στερεοποιεί τη λιθόσφαιρά της; Πότε άρχισε η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών; Σίγουρα η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών καθοδηγείται από τα θερμικά ρεύματα του μανδύα, η έκταση, όμως, και η θέση μιας πλάκας επηρεάζει με τη σειρά της τη θέση των ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων;

2.3.4. Φαινόμενα στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών

Όπως είπαμε, τα θερμικά ρεύματα του μανδύα κινούν τις λιθοσφαιρικές πλάκες, και μάλιστα αναπτύσσονται σχετικές κινήσεις ανάμεσά τους. Οι κινήσεις αυτές, όπως και κάθε δισδιάστατη κίνηση, μπορούν να έχουν μια συνισταμένη παράλληλη στα όρια των πλακών, η οποία οδηγεί τις πλάκες σε πλευρική ολίσθηση, και μια συνισταμένη κάθετη στα όρια των πλακών. Η τελευταία αυτή μπορεί να οδηγήσει τις πλάκες είτε σε σύγκλιση, είτε σε απόκλιση. Γενικά όταν κάτω από τα όρια δυο πλακών υπάρχουν ανοδικά θερμικά ρεύματα οι πλάκες αποκλίνουν, ενώ αντίθετα όταν υπάρχουν καθοδικά θερμικά ρεύματα οι πλάκες συγκλίνουν αν, και τα πράγματα δεν είναι πάντα τόσο απλά.

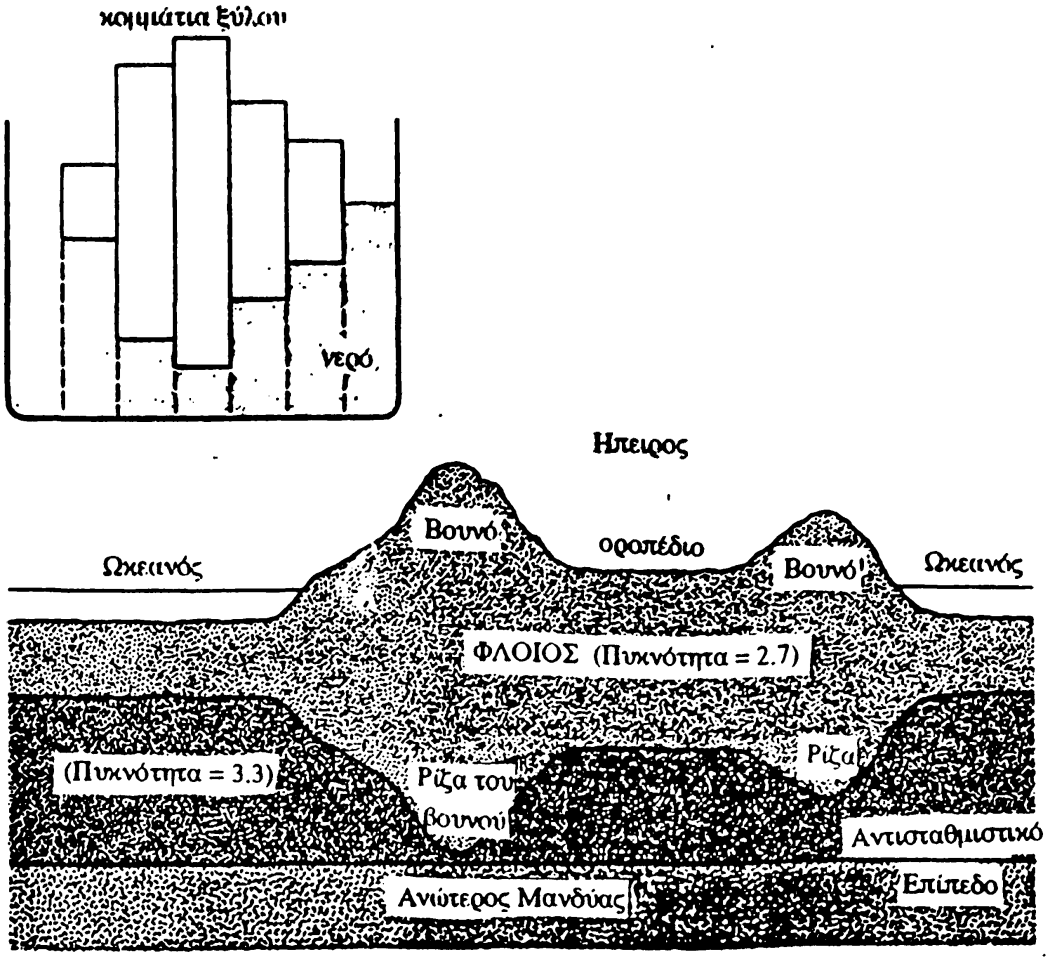
Τι συμβαίνει σε καθεμιά από τις τρεις περιπτώσεις, σύγκλισης, απόκλισης, πλευρικής ολίσθησης; Η περίπτωση της πλευρικής ολίσθησης δεν έχει καμιά σημαντική επίπτωση πάνω στις πλάκες. Δημιουργεί όμως κάποια παρατηρήσιμα τεκτονικά φαινόμενα στο στερεό φλοιό, τα οποία θα τα γνωρίσουμε όταν θα εξετάσουμε το τμήμα αυτό. Οι άλλες δυο περιπτώσεις όμως έχουν σοβαρές επιπτώσεις και στο μανδύα και στο φλοιό.

Ας ξεκινήσουμε με την πιο σημαντική απ' όλες περίπτωση, αυτή κατά την οποία οι πλάκες συγκλίνουν, μιας και αυτό δημιουργεί δυο από τα πιο σημαντικά γεωφυσικά φαινόμενα, τους σεισμούς και τις ορογεννέσεις. Ας ξεκινήσουμε με τις ορογεννέσεις, κάνοντας την εξής παρατήρηση. Από τον 19° αιώνα ήταν γνωστό ότι τα βουνά παρ' όλη την τεράστια μάζα τους, δεν εμφάνιζαν θετικές ανωμαλίες του πεδίου βαρύτητας. Έτσι λοιπόν, υπέθεταν ότι η παραπανήσια ορεινή μάζα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας εξουδετερωνόταν από μια μάζα μικρής πυκνότητας, που ήταν στην ουσία η ρίζα του βουνού, και εισχωρούμε μέχρι το μανδύα. Έπρεπε λοιπόν να βρεθεί ένας μηχανισμός που θα παρήγαγε και τους μεγάλους ορεινούς όγκους αλλά και τις σχετικά μικρότερης πυκνότητας ρίζες τους. Σήμερα πιστεύουμε ότι η αιτία αυτού του μηχανισμού είναι η σύγκλιση δυο λιθοσφαιρικών πλακών. Έτσι, οι γεωλόγοι σήμερα πιστεύουν ότι οι μεγάλες οροσειρές είναι αποτέλεσμα επιφανειακών πτυχώσεων κατά τη διάρκεια ηπειρωτικών συγκρούσεων. Καθώς δηλαδή δυο λιθοσφαιρικές πλάκες συγκλίνουν και εφορμούν η μια πάνω στην άλλη, πράγμα που συνήθως συμβαίνει σε πλάκες που κουβαλάνε πάνω τους τις ηπείρους, ο ηπειρωτικός φλοιός αρχίζει να παραμορφώνεται. Όσο η σύγκλιση συνεχίζεται τόσο και η παραμόρφωση του φλοιού μεγαλώνει, μέχρι το σημείο να δώσει εντυπωσιακά ορεινά συγκροτήματα, όπως οι Άνδεις, τα Ιμαλάϊα, τα όρη της Κεντρικής Ευρώπης κ.λ.π. Η ανύψωση αυτή του γήινου στερεού φλοιού έχει σαν αποτέλεσμα και τη δημιουργία των σχετικά μικρής πυκνότητας περιοχών πάνω από τις οποίες δημιουργήθηκαν οι ορεινές ζώνες. Περισσότερα πάντως θα πούμε όταν θα εξετάσουμε το στερεό φλοιό. Τημ μόνη εξαίρεση στην παραπάνω εικόνα αποτελούν τα βουνά της Ανταρκτικής (Transantarctic) τα οποία έχουν σχηματιστεί στα όρια λιθοσφαιρικών πλακών πουαποκλίνουν. Σήμερα πιστεύουμε ότι κάποια άλληαιτία είναι υπεύθυνη για το σχηματισμό τους, η οποία καταβάλεται προσπάθεια να βρεθεί μέσα από τις έρευνες του προγράμμματος SERIS (Seismic Experiment Ross Ice Shelf).

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση που δυο λιθοσφαιρικές πλάκες οι οποίες συγκλίνουν οδηγούν στη δημιουργία σεισμών. Να υπενθυμίσουμε ότι οι

λιθοσφαιρικές πλάκες κινούνται αργά. Η ταχύτητά τους μπορεί να συγκριθεί μόνο με την ταχύτητα που μεγαλώνουν τα νύχια στα χέρια μας, και συγκεκριμένα είναι διπλάσια η πρώτη από τη δεύτερη. Η σύγκλιση δυο λιθοσφαιρικών πλακών επομένως δεν οδηγεί σε μια βίαιη σύγκρουση, όπως αυτή δυο αυτοκινήτων που κινούνται με μεγάλες και αντίθετες ταχύτητες, όμως είναι οπωσδήποτε ένα φαινόμενο σύγκρουσης. Και όσο και αν οι ταχύτητες των πλακών είναι μικρές οι μάζες τους είναι εντυπωσιακά μεγάλες, άρα μεγάλη είναι και ο ορμή τους, όπως μεγάλη είναι και η κινητική τους ενέργεια. Καθώς το προχώρημα της καθεμιάς πλάκας εμποδίζεται από την άλλη η αρχική κινητική τους ενέργεια μετατρέπεται σιγά-σιγά σε δυναμική ενέργεια, που αποταμιεύεται σε παραμόρφωση των πετρωμάτων των δυο πλακών με τον ίδιο τρόπο που αποταμιεύεται ελαστική ενέργεια σε ένα ελατήριο που συμπιέζεται. Η ενέργεια αυτή μπορεί να πάρει εντυπωσιακά μεγάλες τιμές καθώς τα θερμικά ρεύματα του μανδύα εξακολουθούν να κινούν συνεχώς τις πλάκες. Από κάποιο όριο και πέρα όμως τα πετρώματα αδυνατούν να απορροφήσουν άλλη δυναμική ενέργεια, η τριβή υπερνικιέται και έχουμε ένα απότομο τίναγμα των πλακών και έκλυση όλης της αποταμιευμένης δυναμικής ενέργειας σε σεισμική ενέργεια, δηλαδή σε κινητική ενέργεια των κυμάτων που δημιουργούνται από το απότομο τράνταγμα. Τα κύματα αυτά διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις και κάποτε θα φτάσουν και στην επιφάνεια της Γης, η οποία θα αρχίσει να ταρακουνιέται. Εκείνη τη στιγμή γίνεται ένας σεισμός.

Επειδή η σύγκλιση των δυο λιθοσφαιρικών πλακών συνεχίζεται για πάρα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, τελικά η μια πλάκα καταφέρνει να ανέβει πάνω στην άλλη. Κι' αυτό γιατί δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η άνωση των λιθοσφαιρικών πλακών και η δύναμη που τις κινεί είναι πλύ μεγαλύτερες από τη δύναμη που προκύπτει από οποιονδήποτε σεισμό.

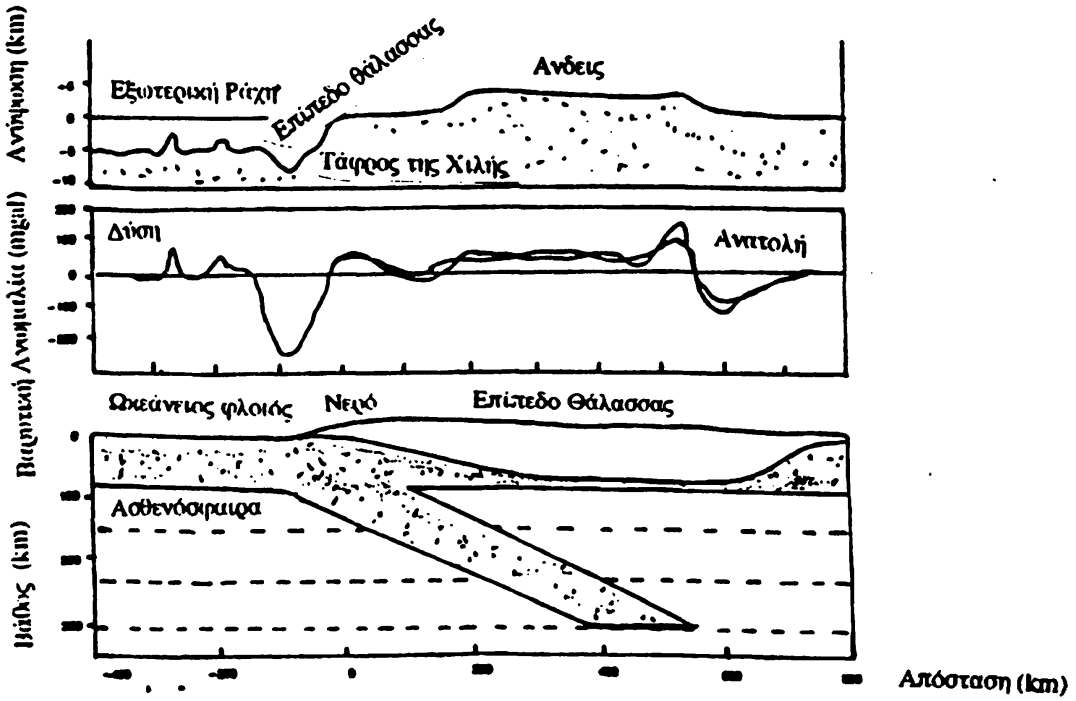


Σύμφωνα με το μοντέλο της ισοστατικής ισορροπίας τα βουνά επιπλέουν στην ασθενόσφαιρα όπως ακριβώς ένα ξύλο στην επιφάνεια του νερού.

Σχήμα 27

Εάν η σύγκρουση γίνεται ανάμεσα σε μια ωκεάνεια πλάκα και σε μια ηπειρωτική, τότε η πλάκα που αρχίζει να βυθίζεται είναι η ωκεάνεια. Αυτό οφείλεται στο ότι η ηπειρωτική πλάκα είναι πιο παχιά και άρα έχει μεγαλύτερη άνωση απ' ότι η ωκεάνεια πλάκα. Το τμήμα της πλάκας που βυθίζεται αρχίζει και ζεσταίνεται κάπως. Εξακολουθεί όμως να είναι πιο κρύο από τα ζεστά υλικά που

το περιβάλλουν. Έτσι κάτω από τη συνεχιζόμενη σύγκλιση των πλακών αλλά και για λόγους υδροστατικούς, τείνει να πάει ακόμα πιο βαθιά. Συνήθως σπάει με κατακόρυφες ρωγμές, και το τμήμα κάτω από τη ρωγμή γλυστρά πιο εύκολα προς τα κάτω. Κάθε απότομη απελευθέρωση ενέργειας από κάθε νέα ολίσθηση της πλάκας που βυθίζεται γεννά και ένα κανούριο σεισμό. Αυτό το είδος των σεισμών παρατηρείται μέχρι βάθους το πολύ 300 km.



Το τμήμα της λιθοσφαιρικής πλάκας που βυθίζεται δίνει, εκτός των άλλων, και βαρυτικές ανωμαλίες, όπως στην περίπτωση της δυτικής ακτής της Χιλής και των Ανδεων. Το επάνω σχήμα είναι ένα τοπογραφικό διάγραμμα της περιοχής αυτής. Η βαρυτική ανωμαλία που παρατηρείται δίνεται από το κεντρικό διάγραμμα σε milligals. (1 gal είναι το 1/980 της κανονικής επιτάχυνσης της βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης.) Οπως βλέπουμε το μέγιστο της βαρυτικής ανωμαλίας είναι -260 milligals.

Σχήμα 28

Σε βάθη μεγαλύτερα από 670 km το τμήμα της πλάκας που βρίσκεται κάτω από μια ρωγμή αρχίζει ξαφνικά να κινείται προς τα πάνω, σαν να συνάντησε μια πολύ μεγάλη αντίσταση στην κίνησή του που δεν του επιτρέπει να κινηθεί άλλο προς τα κάτω. Στο μεταξύ ολόκληρη η πλάκα που βυθίστηκε έχει θερμανθεί αρκετά, έτσι που να μπορεί πια να σέρνεται χωρίς απότομα τραντάγματα. Το τμήμα της πλάκας στο οποίο συμβαίνει αυτό είναι προφανές ότι σταματά πια να παράγει σεισμούς. Από τη στιγμή που ένα τμήμα μιας πλάκας άρχισε να βυθίζεται έως τη στιγμή που θα αποκτήσει την ιδιότητα να σέρνεται βυθισμένο στις υψηλές θερμοκρασίες της ασθενόσφαιρας του μανδύα εκτιμέται ότι θα περάσουν περίπου 10 εκατομμύρια χρόνια. Περισσότερα όμως για τους σεισμούς θα πούμε παρακάτω.

Συμπερασματικά, λοιπόν, καταλήγουμε στο ότι το πρώτο επάνω τμήμα μιας πλάκας που βυθίζεται συναντά λίγη αντίσταση και βρίσκεται υπό τάση, ενώ το κατώτερο τμήμα της συναντά πολύ μεγάλη αντίσταση και βρίσκεται υπό συμπίεση. Και τα δυο τμήματα δίνουν σεισμούς, καθώς η κίνησή τους γίνεται με απότομα τραντάγματα, ενώ η περιοχή που τα χωρίζει είναι σεισμικά νεκρή. Ίσως, οι διαφορετικές συνθήκες κάτω υπό τις οποίες βρίσκονται τα δυο τμήματα της πλάκας να τις έχουν δημιουργήσει σπασίματα στην περιοχή αυτή.

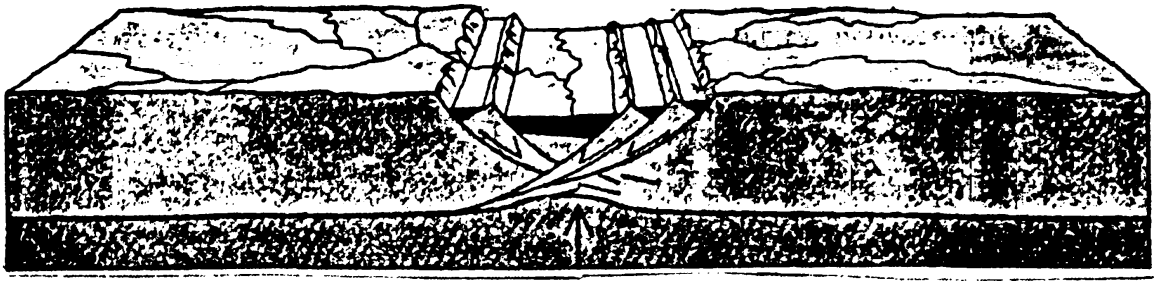
Η πλάκα που βυθίζεται και κατέρχεται στο ζεστό μανδύα συμμετέχει πια στη θερμική ροή του τμήματος αυτού, που δίνει μια παραπέρα ώθηση στην κίνηση της πλάκας. Μεταφέροντας η τελευταία υλικά διαφορετικά απ' αυτά που έχει ο μανδύας, τον μολύνει χημικά και ταυτόχρονα επειδή η ίδια είναι πιο κρύα απ' αυτόν τον κρυώνει. Έτσι, λοιπόν, η πλάκα που βυθίζεται αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της δυναμικής του μανδύα. Και στο σημείο αυτό προκύπτει το ερώτημα. Είναι η σημερινή κατάσταση του μανδύα μια σταθερή κατάσταση που επιτεύχθηκε αρκετά, χρόνια πριν, ή η περιοχή αυτή του εσωτερικού της Γης πηγαίνει τώρα προς μια σταθερή κατάσταση στην οποία συμμετέχει και η βύθιση των λιθοσφαιρικών πλακών; Δυστυχώς το ερώτημα αυτό, όπως και πολλά άλλα, άλλωστε, δεν έχει εύκολη απάντηση. Θα πρέπει, πάντως να συνειδητοποιήσουμε

ότι εδώ και πολλά χρόνια στη γεωλογική κλίμακα, η διαδικασία της βύθισης των λιθοσφαιρικών πλακών έχει οδηγήσει στο εσωτερικό της Γης εντυπωσιακούς όγκους πετρωμάτων και ιζημάτων, ενώ ταυτόχρονα τα ανοδικά ρεύματα έχουν συμβάλλει στη δημιουργία μεγάλων εκτάσεων νέας λιθόσφαιρας, κύρια στις μεσοωκεάνειες ράχεις.

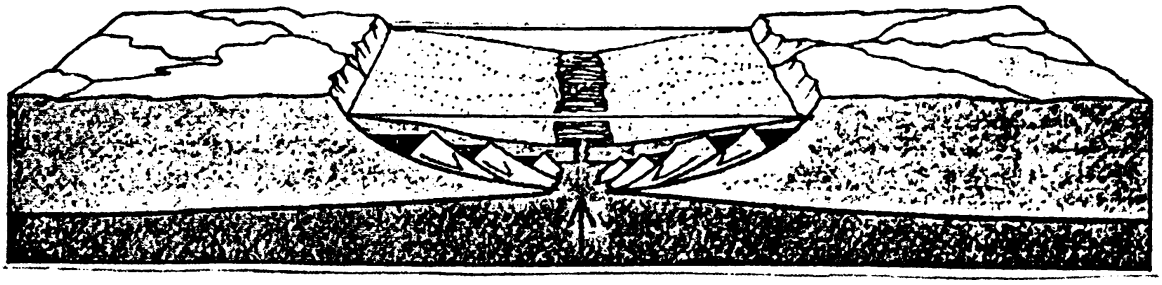
Ας συνεχίσουμε τώρα με την περίπτωση όπου οι πλάκες αποκλίνουν, έτσι ώστε η μεταξύ τους απόσταση να μεγαλώνει συνεχώς, σχηματίζοντας μια ράχη. Είναι προφανές ότι με τη διεύρυνση της ράχης μειώνεται η πίεση που δέχονται τα υλικά του μανδύα που βρίσκονται ακριβώς από κάτω. Έτσι, ένα τμήμα του μανδύα αρχίζει να κινείται κάπως πιο ελεύθερα προς τα πάνω. Το ανοδικό αυτό ρεύμα αρχίζει από ένα βάθος 50 έως 70 km και φτάνει έως τη βάση του φλοιού. Η αποσυμπίεση των υλικών του μανδύα που ανέρχονται γίνεται αδιαβατικάδηλαδή χωρίς την απώλεια θερμότητας. Κάτω από τις συνθήκες αυτές ο περιδοτίτης που αποτελεί το κύριο ανερχόμενο υλικό αρχίζει να τήκεται.

Όταν το ζεστό υλικό του μανδύα φτάσει στη βάση του φλοιού έχει ήδη κρυώσει αρκετά και αρχίζει να στερεοποιείται. Έχουμε δηλαδή δημιουργία καινούριου φλοιού στις ράχεις, ο οποίος είναι προφανές ότι είναι γεωλογικά πολύ νεώτερος από τον ήδη υπάρχοντα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως σε ράχεις που υπάρχουν κάτω από ωκεανούς, και για το λόγο αυτό ονομάζονται μεσοωκεάνειες ράχεις. Οι μεσοωκεάνειες λοιπόν ράχεις διευρύνονται συνεχώς, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή διεύρυνση και των ωκεανών. Η μέση ταχύτητα με την οποία διευρύνεται για παράδειγμα η μεσοωκεάνεια ράχη του Ατλαντικού είναι περίπου 5 cm/year, ενώ για τη μεσοωκεάνεια ράχη του ανατολικού Ειρηνικού η αντίστοιχη τιμή είναι περίπου 15 cm/year. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε χρόνο τη δημιουργία μερικών τετραγωνικών χιλιομέτρων νέου φλοιού, ο οποίος είναι πολύ διαφορετικός από αυτόν που υπάρχει ήδη στις ηπείρους. Εκτός του ότι είναι γεωλογικά νεώτερος, όπως είπαμε, έχει και τελείως διαφορετική σύσταση, μιας και έχει προέλθει από στερεοποίηση υλικών του μανδύα. Ο νεοδημιουργούμενος φλοιός απλώνεται σαν ένα χαλί που ξετυλίγεται

σιγά-σιγά. Σε κάθε εποχή δημιουργείται και ένα καινούριο στρώμα απ' αυτόν, ακριβώς όπως κάθε χρόνο σχηματίζεται και ένα δαχτυλίδι στον κορμό ενός δέντρου.



Επίπεδο θάλασσας



Επίπεδο θάλασσας

Ενώ η βύθιση μιάς λιθοσφαιρικής πλάκας καταστρέφει τη λιθόσφαιρα, στις μεσοωκεάνειες ράχεις έχουμε συνεχή δημιουργία νέας λιθόσφαιρας.

Σχήμα 29

Το προσδιοριστικό επίθετο "μεσοωκεάνεια", θα πρέπει να σημειώσουμε ότι παρ' ότι είναι κατάλληλο και αποδίδει την πραγματικότητα για τη ράχη του Ατλαντικού και του Ινδικού ωκεανού, είναι λαθεμένο για τη ράχη του Ειρηνικού. Ο Ατλαντικός και ο Ινδικός ωκεανός είναι ωκεανοί που δημιουργήθηκαν από χωρισμούς ηπειρωτικών μαζών. Έτσι, είναι φυσικό η ράχη τους να είναι άξονας συμμετρίας ανάμεσα στις ηπείρους που χωρίστηκαν και να βρίσκεται στη μέση των νερών τους. Όμως ο Ειρηνικός ωκεανός δεν σχηματίστηκε μ' αυτόν τον τρόπο, αλλά αντίθετα είναι η παλιά Πανθάλασσα που συρικνώνεται και μειώνει συνεχώς την έκτασή της καθώς ανοίγονται νέες ωκεάνειες λεκάνες. Αν και ο ωκεανός αυτός έχει μια ράχη, αυτή τον διατρέχει από το βορά προς το νότο αρκετά προς τα ανατολικά του άξονα συμμετρίας του. Η μεσοωκεάνεια ράχη του Ανατολικιού Ειρηνικού έχει μελετηθεί αρκετά καλά με το σύστημα Sonar Sea Marc I. Με το σύστημα αυτό προσπαθούμε να βρούμε το βαθμό ανακλαστικότητας των υλικών του βυθού, και επομένως την ακριβή σύστασή του. Η παραπάνω ράχη εκτείνεται κατά μήκος του Μεξικού, της Κεντρικής Αμερικής και της Νότιας Αμερικής.

Ένα εντυπωσιακό φαινόμενο που παρατηρείται πάνω από τις μεσοωκεάνειες ράχεις είναι και αυτό των μαύρων πηδάκων του νερού. Πιο συγκεκριμένα, κοντά σε μια μεσοωκεάνεια ράχη, στις ρωγμές του νεοσχηματισμένου φλοιού μπαίνει νερό. Το νερό αυτό ζεσταίνεται και στη συνέχεια εκτινάσσεται προς τα πάνω, από διάφορα κανάλια που δημιουργεί η πίεσή του. Το μαύρο χρώμα του οφείλεται στο ότι περιέχει οξείδια του θείου. Επειδή στις μεσοωκεάνειες ράχεις έχουμε συνεχή απόθεση υλικών, αυτές έχουν μεγαλύτερο ύψος από τις άλλες περιοχές των ωκεανών. Έτσι, στην ουσία οι ράχεις αυτές είναι ένα υποθαλάσσιο σύστημα οροσειρών που το μήκος τους μπορεί να φτάσει μέχρι και 60.000 km.

Αρχικά οι γεωλόγοι πίστευαν ότι οι μεσοωκεάνειες ράχεις βρίσκονται ακριβώς πάνω από τα ανοδικά θερμικά ρεύματα του μανδύα, και ότι στην ουσία είναι τα ίδια αυτά ρεύματα που αποθέτουν το ζεστό υλικό στη βάση του φλοιού. Αργότερα, όμως, άρχισαν να εμφανίζονται σοβαρές αμφιβολίες κατά πόσο

ακριβώς πάνω από ένα ανερχόμενο ρεύμα υπάρχει μια μεσοωκεάνεια ράχη. Ίσως η κυκλοφορία των θερμικών ρευμάτων του μανδύα είναι μια μάλλον δύσκολη υπόθεση, που χρειάζεται αρκετή δουλειά στο μέλλον για να μας δείξει όλα τα χαρτιά της. Γι' αυτό το τελικό μας συμπέρασμα, λοιπόν, ας είναι ότι η Γη διαθέτει στο εσωτερικό της εντυπωσιακά μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας, όχι ομοιόμορφα κατανεμημένα. Η ακριβής όμως παρουσίαση του θερμικού προφίλ του πλανήτη μας είναι ακόμη και σήμερα δύσκολο να γίνει.

Πολλές φορές, το ανερχόμενο υλικό του μανδύα καταφέρνει να φτάσει μέχρι και την επιφάνεια της Γης, οπότε εκχύνεται από τον κρατήρα ενός ηφαιστείου υπό μορφή λάβας. Πριν η λάβα βρει διέξοδο προς τα πάνω, πάντως, συγκεντρώνεται σε ένα θάλαμο κάτω από το στερεό φλοιό, ο οποίος μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί με τεχνητά σεισμικά κύματα. Με πολύ λίγες εξαιρέσεις, όλη σχεδόν η ηφαιστειακή δραστηριότητα εντοπίζεται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, ακόμη και αν πάνω από τα όρια αυτά βρίσκονται ωκεανοί. Έχουμε δηλαδή και υποθαλάσσια ηφαίστεια στα όρια δυο πλακών που αποκλίνουν, δηλαδή σε μια μεσοωκεάνεια ράχη. Τα τελευταία αυτά φέρνουν στην επιφάνεια κυρίως βασαλτική λάβα. Αντίθετα, τα ηφαίστεια στα όρια ηπειρωτικών πλακών ή μιας ηπειρωτικής και μιας ωκεάνειας πλάκας που συγκλίνουν φέρνουν στην επιφάνεια λάβα που περιέχει πυρίτιο, ασβέστιο και λίγο σίδηρο και μαγνήσιο. Είναι κυρίως υλικά από την πλάκα που βυθίζεται και μέρος της λυώνει. Τα νησιά των Φιλιππίνων για παράδειγμα είναι φτιαγμένα από λάβα που ανήλθε στην επιφάνεια μέσα από τη δεύτερη αυτή διαδικασία.

Οι πιο σημαντικές ηφαιστειακές εκρήξεις που είναι καταγραμμένες στην ιστορία είναι οι εξής: Mont Pelé (Καραϊβική 1902), Krakatoa (Ινδονησία 1883) Tambora (Ινδονησία 1815), Laki (Ισλανδία 1783), Vesuvius (Ιταλία 79 π.Χ.), Θήρα (Ελλάδα, άγνωστη χρονολογία, εικάζεται όμως ότι συνέβηκε γύρω στο 1320 π.Χ.).

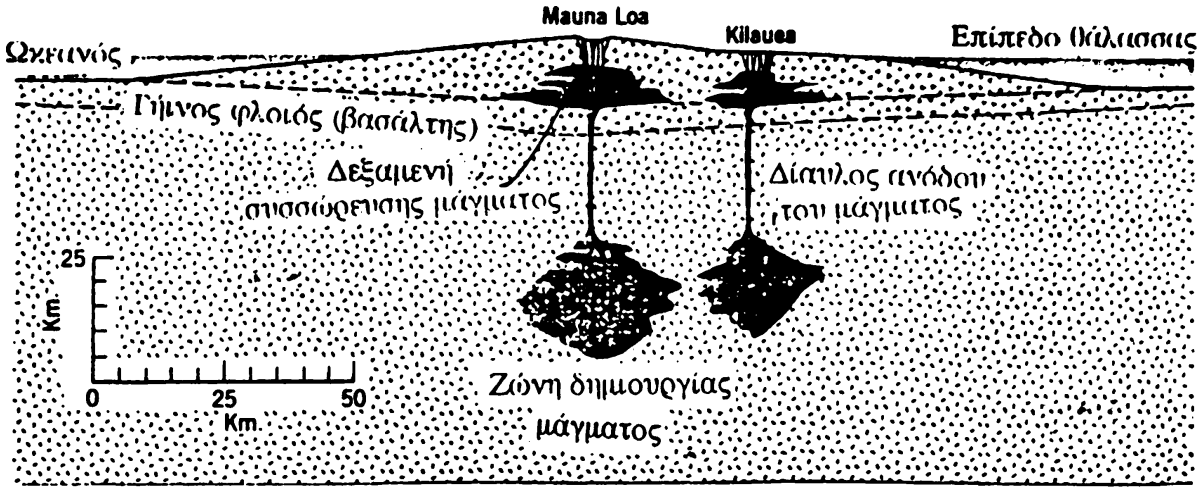
Οπως συμβαίνει με τους σεισμούς, έτσι και με τα ηφαίστεια μας ενδιαφέρει να ξέρουμε πότε είναι πιθανόν να εκρΑγούν. Αυτό μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, αλλά όχι πάντα και τόσο αποτελεσματικούς. Οι κύριες μέθοδοι

πρόγνωσης των ηφαιστειακών εκρήξεων πάντως στηρίζονται στο ότι η έντονη μετακίνηση της λάβας πριν από την έκρηξη δημιουργεί μιά σειρά από μικρούς σεισμούς, όπως και μικρές μεταβολές στο βαρυτικό πεδίο της Γης.

Υπολογίζεται ότι κάθε 30 εκατομμύρια χρόνια, συμβαίνει ένα επεισόδιο έντονης ηφαιστειακής δράσης που διαρρηγνύει τη λιθόσφαιρα. Η διεργασία αυτή μπορεί να προσθέτει κατά μέσο όρο περίπου 300 km^3 ύλης κάθε χρόνο στις ηπείρους, τα σχετικά πρόσφατα χρόνια. Τα πρώτα χρόνια της δημιουργίας της Γης, οπότε ο μανδύας ήταν και πιο ζεστός, θα έφταναν στην επιφάνεια της Γης πολύ μεγαλύτερες ποσότητες μάγματος. Ο μέσος όρος αύξησης των ηπείρων από την εποχή της δημιουργίας της Γης είναι πιθανόν 1 km^3 ανά έτος, πράγμα που δείχνει ότι η ηφαιστειακή δράση στα ανοίγματα της λιθόσφαιρας είναι η πιο πιθανή εξήγηση για αυτό. Βέβαια, η υπόθεση αυτή συναντά κάποια προβλήματα στην εξήγηση της ακριβής χημικής εξήγησης του στερεού λιθοσφαιρικού φλοιού.

Όπως τα σεισμικά κύματα, έτσι και η ηφαιστειακή λάβα είναι μια σημαντική πηγή πληροφορίας τόσο για τη χημική σύσταση όσο και για τις διεργασίες που γίνονται στα έγκατα της Γης. Για παράδειγμα το νησί της Χαβάης έχει χτιστεί εξ ολοκλήρου από ηφαιστειακές εκρήξεις. Σήμερα υπάρχει εκεί το ενεργό ηφαίστειο Mauna Loa, που έχει εκραγεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια του αιώνα μας, και πολλά σβησμένα ηφαίστεια. Η λάβα στην περιοχή αυτή ανεβαίνει από το κέντρο μιας πολύ ζεστής περιοχής του μανδύα που κινείται προς τα πάνω, από μια ράχη δηλαδή, η οποία έχει πολύ πιο μεγάλη έκταση και από την ίδια τη Χαβάη. Η ράχη αυτή δημιουργείται από την αργή κίνηση της πλάκας του Ειρηνικού προς τα Βορειοδυτικά. Από μετρήσεις των ισοτόπων της λάβας του ηφαιστείου Mauna Loa βγαίνει το συμπέρασμα ότι αυτή δεν έχει αναμιχθεί με το υπόλοιπο υλικό του εξωτερικού μανδύα, και ότι προέρχεται μάλλον από μια περιοχή του μανδύα που παραμένει απομονωμένη από τα υπόλοιπα θερμικά ρεύματα και για πάνω από 1 δισ. χρόνια. Ίσως ακόμη η λάβα αυτή να έρχεται από τον εσωτερικό μανδύα, δείχνοντας έτσι για μια ακόμη φορά ότι η όλη ιστορία της κυκλοφορίας στο μανδύα είναι μια αρκετά δύσκολη υπόθεση.

Η περιοχή από την οποία προέρχεται μια ηφαιστειακή λάβα όπως και η πορεία που ακολούθησαν τα υλικά της λάβας μέχρι να εκτιναχθούν από τον κρατήρα μπορούν να ανιχνευτούν, αν και όχι πάντοτε, από την εξέταση των ισοτόπων που περιέχει, και κυρίως του στρόντιου, του νεοδήμιου κ.λ.π., μιας και η κάθε περιοχή του φλοιού όπως και του μανδύα δίνει τις δικές της αναλογίες στα ισότοπα αυτά. Έτσι, η λάβα μπορεί να προέρχεται. 1) Από ανάμιξη υλικών του εξωτερικού μανδύα και του ωκεάνειου φλοιού που βυθίζεται ακολουθώντας μια πλάκα. 2) Από υλικά του μανδύα που ανέρχονται με τα θερμικά ρεύματα. 3) Από υλικά που ξεφεύγουν από τον εσωτερικό μανδύα και στη συνέχεια ανέρχονται μέχρι το στερεό φλοιό.



Υποθετική διατομή των ηφαιστείων Mauna Loa και Kilauea της Χαβάης.

Σχήμα 30

Πάντως η εξαγωγή άμεσων συμπερασμάτων από την εξέταση της ηφαιστειακής λάβας εμπεριέχει και αρκετά προβλήματα. Έτσι, αρκετές φορές δεν γνωρίζουμε ούτε από ποια περιοχή του μανδύα προέρχεται, ούτε αν είναι αντιπροσωπευτικό δείγμα της περιοχής αυτής. Είναι πολύ πιθανό ότι κουβαλά μαζί της μόνο τα πιο ελαφρά από τα συστατικά του μανδύα, και αφήνει ευθύς εξαρχής ή καθ' οδόν τα πιο βαριά απ' αυτά. Όμως, είναι πολύ παρακινδυνευμένο

να υπολογίσει κανείς τι ακριβώς μένει πίσω και σε τι ποσοστό, δεδομένου ότι απ' την άλλη μεριά μιλάμε για μια γιγαντιαία κυκλοφορία που μπορεί να παρασύρει στο διάβα της ακόμη και κάποια πολύ βαριά συστατικά.

Αν και πολλοί ισχυρίζονται ότι οι εκρήξεις των ηφαιστείων με την πληθώρα των υλικών και αερίων που φέρνουν στην ατμόσφαιρα από τα έγκατα της Γης έχουν μια σημαντική επίπτωση στο κλίμα της Γης, εντούτοις αυτό είναι δύσκολο να εξακριβωθεί. Κι' αυτό γιατί οι μεγάλες ηφαιστειακές εκρήξεις του απώτερου παρελθόντος δεν έχουν καθόλου καταγραφεί αλλά ούτε και τα αποτελέσματά τους είναι σαφή. Μόνο υποθέσεις μπορεί να κάνει κανένας στο σημείο αυτό.

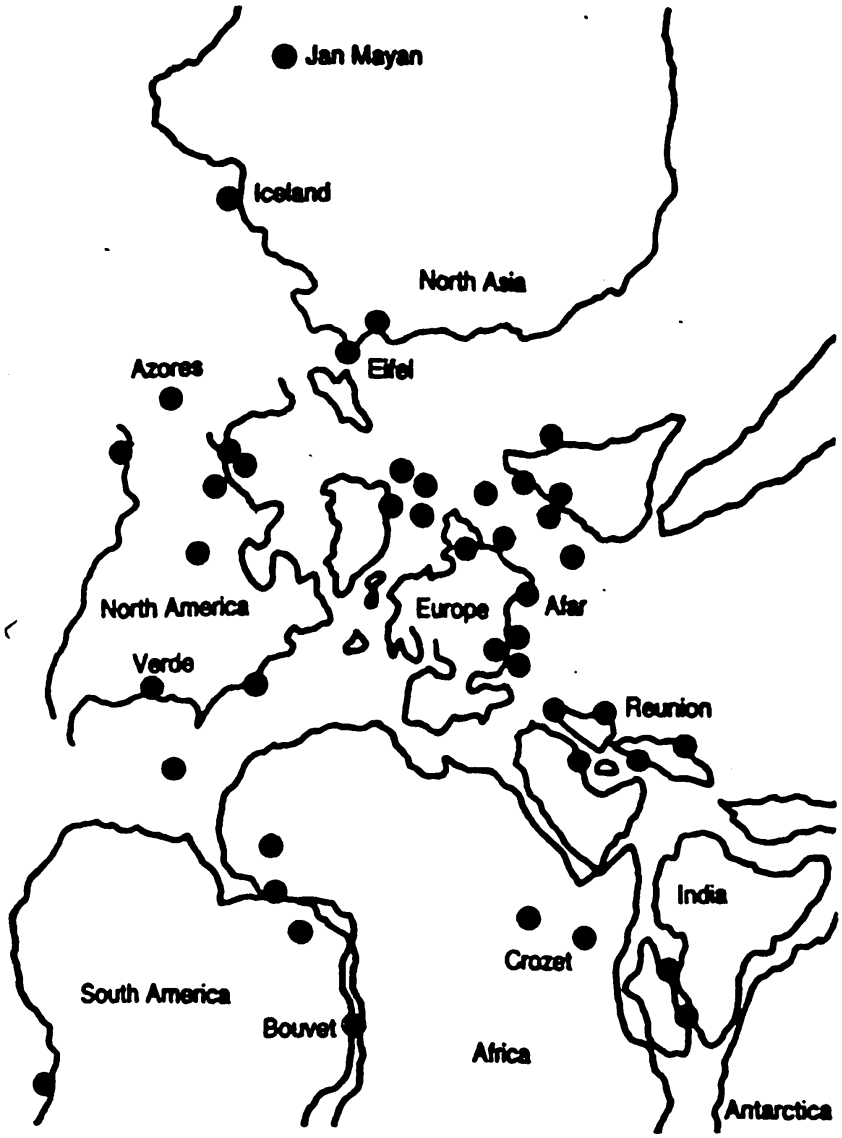
Σήμερα οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών και οι ταχύτητές του ελέγχονται μέσα από το σύστημα GPS 9 Global Posiotioning System), το οποίο χρησιμοποιεί ένα δίκτυο από δορυφόρους. Με τοσύστημα αυτό μπορούν να ανιχνευτούν κινήσεις ακόμη και πολύ μικρών τμημάτων της γήινης επιφάνειας, όπως για παράδειγμα του Αιγαίου πελάγους. Τέτοιες μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας αναμένεται να λύσουν αρκετά από τα προβλήματα που υπάρχουν μέχρι τη στιγμή αυτή, ή, όπως συμβαίνει συχνά στην επιστημονική έρευνα, να δημιουργήσουν άλλα.

2.3.5. Καυτές κηλίδες

Εκτός, πάντως, από τα κανονικά θερμικά ρεύματα του μανδύα, στα οποία τώρα οφείλεται η τεκτονική δράση του πλανήτη μας όπως την παρουσιάσαμε παραπάνω έχει προταθεί και η ύπαρξη σ' αυτών ανώμαλων περιοχών, γνωστών σαν "καυτές κηλίδες".Τα περισσότερα ωκεάνεια νησιά, μεταξύ των οποίων αυτά της Χαβάης και της Ισλανδίας, θεωρείται ότι είναι οι επιφανειακές εκφράσεις κάποιων καυτών κηλίδων. Στην ουσία, πρόκειται για περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας απ' ότι έχουν τα υλικά του μανδύα σ' αυτό το βάθος, μικρότερης

πυκνότητας και μικρότερου ιξώδους. Σχηματίζονται μάλλον χαμηλά στο μανδύα και ανεβαίνουν σιγά-σιγά προς τα πάνω, έχοντας ένα σχεδόν σφαιρικό σχήμα, και ανοίγοντας δρόμο ανάμεσα στα πιο ψυχρά και πιο πυκνά υλικά του μανδύα. Όταν φτάσουν κοντά στο στερεό φλοιό τον ανυψώνουν λίγο και του δημιουργούν τάσεις, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση ηπειρωτικών ρηγμάτων. Πιο συγκεκριμένα όταν φτάνει στη λιθόσφαιρα η κηλίδα απλώνεται σαν μανιτάρι, και η θερμική ροή αποκτά και μια οριζόντια συνιστώσα. Να σημειώσουμε ότι κάθε κηλίδα έχει διάμετρο μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων. Ίσως οι καυτές αυτές κηλίδες του μανδύα να είναι υπεύθυνες για την αυξημένη ηφαιστειακή δράση κάποιων χρονικών περιόδων. Εάν λάβει κανένας υπόψη του ότι οι τυπικές ταχύτητες των θερμικών ρευμάτων του μανδύα είναι της τάξης του 1 m ανά έτος, τότε από τη στιγμή του σχηματισμού τους οι καυτές κηλίδες χρειάζονται μερικά εκατομμύρια χρόνια μέχρι να φτάσουν στο στερεό φλοιό. Από την άλλη μεριά αυξημένη καταστροφική ηφαιστειακή δραστηριότητα φαίνεται να παρατηρείται κάθε 200 εκατομμύρια χρόνια, ενώ μικρότερης έκτασης δραστηριότητα παρατηρείται και κάθε 30 εκατομμύρια χρόνια. Αυτό ίσως σημαίνει την ταυτόχρονη ύπαρξη μερικών καυτών κηλίδων στο μανδύα.

Οι καυτές κηλίδες πάντως δίνουν απομονωμένες περιοχές μεγάλης ηφαιστειακής δραστηριότητας, η οποία δεν συμπίπτει με τη συνηθισμένη δραστηριότητα στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, αλλά εντοπίζεται στο εσωτερικό της περιοχής των πλακών αυτών. Έτσι, μπορεί να εμφανιστεί ένα ηφαίστειο στη μέση μιας πλάκας, απομονωμένο από τις γνωστές περιοχές ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η λάβα που βγαίνει από ένα τέτοιο ηφαίστειο όπως είπαμε κατ' αρχάς προκαλεί μια μικρή ανύψωση του στερεού φλοιού, ένα πρήξιμο, όταν δε χυθεί διαπιστώνουμε ότι διαφέρει από τη λάβα των συνηθισμένων ηφαιστείων. Περιέχει βασάλτη, όπως και η λάβα στις μεσοωκεάνειες ράχεις, αλλά και μέταλλα (λίθιο, κάλιο κ.λ.π.) που δεν τα περιέχει αυτή, αλλά ούτε και η λάβα στα όρια σύγκλισης δυο πλακών. Η διάμετρος της περιοχής που ανυψώνεται πάνω από μια καυτή κηλίδα φτάνει μέχρι και τα 200 km.



Οι καυτές κηλίδες οι οποίες υπήρχαν 350 εκατομμύρια χρόνια κάτω από την Πανγαία. Η υπερήπειρος αυτή υπήρξε σταθερή για ένα σημαντικό διάστημα, έως ότου άρχισε ο κατακερματισμός της πριν από 150 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Πολλές από τις καυτές κηλίδες που υπάρχουν σήμερα υπήρχαν και την εποχή της Πανγαίας, και ίσως η ύπαρξή τους είναι συνέπεια της δημιουργίας της υπερηπείρου αυτής.

Σχήμα 31

Ο μηχανισμός που δημιουργεί τις καυτές κηλίδες μας είναι άγνωστος προς το παρόν. Δεν ξέρουμε δε ούτε σε ποια ακριβώς περιοχή του μανδύα δημιουργούνται. Το γεγονός ότι έχουν μια χημική σύνθεση η οποία διαφέρει από εκείνη των θερμικών ρευμάτων του μανδύα, όπως φαίνεται από την αντίστοιχη ηφαιστειακή λάβα, μας δείχνει ότι η πηγή τους είναι κατά κάποιον τρόπο απομονωμένη από τη γενική θερμική κυκλοφορία του μανδύα. Είναι πιθανόν οι λιθοσφαιρικές πλάκες όχι μόνο να επηρεάζονται από τα θερμικά ρεύματα του μανδύα, αλλά να τα επηρεάζουν κι' αυτές με τη σειρά τους. Έτσι, οι καυτές κηλίδες θα μπορούσαν να δημιουργηθούν ανάμεσα στην περιοχή δυο ανοδικών ρευμάτων, η οποία έχει μια σχετική ηρεμία. Ίσως ακόμη να δημιουργούνται πολύ βαθιά στο μανδύα σε περιοχές στις οποίες δεν φτάνει η συνηθισμένη θερμική κυκλοφορία του εξωτερικού μανδύα.

Αξίζει να αναφέρουμε, πάντως, ότι πολλοί επιστήμονες θεωρούν ότι τόσο οι θέσεις όσο και η γέννηση των καυτών κηλίδων είναι άμεσα συνδεδεμένες με το σχηματισμό της Παγγαίας πριν από 150 εκατομμύρια χρόνια. Σε μια τέτοια περίπτωση ο σχηματισμός αυτός θα πρέπει να επέφερε πράγματι μεγάλη αναστάτωση στη θερμική κυκλοφορία του μανδύα.

Είναι σημαντικό ότι οι επιστήμονες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η σχετική θέση των περιοχών στις οποίες ανέρχονται καυτές κηλίδες ή παραμένει αμετάβλητη ή μεταβάλλεται πολύ λίγο, και πάντως με μια ταχύτητα μικρότερη από εκείνη των λιθοσφαιρικών πλακών. Θα μπορούσαν έτσι οι ανωμαλίες αυτές κατά κάποιο τρόπο να μας δώσουν ένα σταθερό πλέγμα συστήματος αναφοράς. Τα τελευταία 10 εκατομμύρια χρόνια έχουν εντοπιστεί τουλάχιστον 122 καυτές κηλίδες. Απ' αυτές οι 53 είναι στους ωκεανούς και οι 69 σε ηπειρωτικές μάζες. Τη μερίδα του λέοντος έχει πάντως η Αφρικανική πλάκα, το εσωτερικό της οποίας φιλοξενεί 25 κηλίδες στην ηπειρωτική μάζα, 8 στη θάλασσα και 10 κοντά στις μεσοωκεάνειες ράχεις. Σύνολο δηλαδή 43 κηλίδες. Υπάρχει έτσι μια τελείως ασύμμετρη κατανομή τόσο σε σχέση με τις ωκεάνειες και ηπειρωτικές μάζες όσο

και σε σχέση με τις ηπειρωτικές μάζες. Να σχετίζεται αυτό το γεγονός με την πιθανολογούμενη ακινησία της Αφρικανικής πλάκας;

Μια από τις πιο σημαντικές θερμοκρασιακές ανωμαλίες του μανδύα, η οποία σχετίζεται με μια καυτή κηλίδα υπάρχει κάτω από τον Ατλαντικό ωκεανό. Η ανώμαλη αυτή διαμόρφωση έχει μια διάμετρο περίπου 1500 km. Στην περιοχή αυτή ο μανδύας φαίνεται να είναι γύρω στους 150 ^{o}C πιο ζεστός απ' ότι κανονικά είναι, και το κέντρο της βρίσκεται στην καυτή κηλίδα του Cape Verde. Ακόμη και αρκετά μακριά από την καυτή κηλίδα ο μανδύας φαίνεται να είναι 100° με 150 ^{o}C πιο ζεστός από το κανονικό. Καθώς το ζεστό υλικό της περιοχής αυτής συναντά τη λιθόσφαιρα, ανακλάται σχηματίζοντας κάτι σαν το μανιτάρι της ατομικής βόμβας. Το κεφάλι αυτό του μανιταριού σηκώνει λίγο το βυθό της θάλασσας. Τέτοιες περιοχές με ανώμαλα υψηλές θερμοκρασίες είναι πολύ πιθανό ότι περιβάλλουν και άλλες καυτές κηλίδες.

Η καυτή κηλίδα της Χαβάης είναι μιά ανώμαλη περιοχή του μανδύα με υψηλή θερμοκρασία, η οποία έχει παραμείνει σχεδόν σταθερή για δεκάδες εκατομμύρια χρόνια, τροφοδοτώντας τα ηφαίστεια της περιοχής. Καθώς η πλάκα του Ειρηνικού μετακινείται προς τα βορειοδυτικά, παλιά ηφαίστεια της περιοχής σβήνουν και εμφανίζονται νέα, έτσι που τα νησιά μεγαλώνουν από τη λάβα τους προς τα νοτιοανατολικά. Η παραπάνω καυτή κηλίδα σήμερα τροφοδοτεί με μάγμα πέντε ηφαίστεια, συμπεριλαμβανομένου και αυτού της Kilauea.

Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι υπάρχει μια μεγάλη συσχέτιση ανάμεσα σε καυτές κηλίδες και σε θετικές βαρυτικές ανωμαλίες. Οι καυτές κηλίδες όμως από μόνες τους δεν μπορεί να είναι η πηγή της παραπανήσιας μάζας για την εμφάνιση αυτών των ανωμαλιών. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η πλήρης κατανόηση της δυναμικής των καυτών κηλίδων θα μας αποκαλύψει αρκετά από τα μυστικά που κρύβει στο εσωτερικό του ο πλανήτης μας.

Επίσης, άλλες πρόσφατες παρατηρήσεις έχουν οδηγήσει τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι μερικές από τις θεωρούμενες καυτές κηλίδες δεν είναι και τόσο πιό θερμές από τον μανδύα που τις περιβάλλει, όπως αρχικά φαινόταν. Πρόκειται

μάλλον για περιοχές στις οποίες υπάρχει περισσότερο νερό απ' ότι έχει κανονικά ο μανδύας, οδηγώντας τα υλικά που βρίσκονται σ' αυτές σε πιό εύκολη τήξη. Το τελευταίο αυτό ήταν εκείνο που οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για πολύ ζεστές πειοχές του μανδύα. Ετσι, λοιπόν, φαίνεται ότι ο μανδύας έχει δυό ειδών ανώμαλες περιοχές. Τις καυτές κηλίδες, με μεγαλύτερη από το κανονικό θερμικρασία, και τις "υγρές" κηλίδες, με περισσότερη από το κανονικό περιεκτικότητα σε νερό.

Είπαμε παραπάνω ότι η τεκτονική δράση του πλανήτη μας έχει μια μοναδικότητα, και ότι κανένας από τους άλλους πλανήτες δεν παρουσιάζει μια τέτοια δράση σήμερα. Αν περιοριστούμε στους γειτονικούς μας πλανήτες και στο δορυφόρο μας, τότε διαπιστώνουμε τα εξής. Η Αφροδίτη, που και ως προς το μέγεθος και ως προς τη μέση πυκνότητα μοιάζει στη Γη, έχει λίγες ηφαιστειακές διαμορφώσεις μεγάλου μεγέθους. Κατά τα άλλα όμως έχει μια ομαλή τοπογραφία. Η επιφάνεια του Άρη έχει λίγα παλιά ηφαίστεια, μεγάλου μεγέθους και αυτά, που δεν προκαλούν πια καμιά αναταραχή σ' αυτόν. Σε παλιότερα χρόνια θα πρέπει να έδωσαν εντυπωσιακές εκρήξεις, μιας και το γεγονός ότι βρίσκονται πολύ κονρά στον Ισημερινό του πλανήτη μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δράση τους επέδρασε στον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής του. Η Σελήνη τέλος είχε μια έντονη ιστορία στην αρχή της δημιουργίας της όταν ήταν ένα ζεστό μάγμα στο οποίο επέπλεαν διάφορα "βράχια", αλλά πέρασε πολύ γρήγορα από το στάδιο αυτό σ' εκείνο ενός γερασμένου πλανήτη που παραμένει ήσυχος χωρίς σημάδια έντονων κινήσεων στο εσωτερικό του.

2.4. Ο Στερεός φλοιός

2.4.1 Ιδιότητες και σύσταση

Ο στερεός φλοιός είναι το εξωτερικό περίβλημα της Γης και αρχίζει από την επιφάνεια έως και την ασυνέχεια Mohorovicic. Η τελευταία είναι μια ζώνη της οποίας το πλάτος κυμαίνεται από λιγότερο του 1 km έως αρκετά km βρίσκεται δε μέσα στις λιθοσφαιρικές πλάκες. Το πάχος του φλοιού δεν είναι παντού το ίδιο. Στις ηπείρους το πάχος του κυμαίνεται από 10 έως πάνω από 70 km, ενώ στους ωκεανούς το πάχος του είναι κατά μέσο όρο από 10 έως 12 km. Η μέση πυκνότητα του φλοιού είναι και πάλι συνάρτηση της γεωγραφικής του θέσης. Ο φλοιός κάτω από τους ωκεανούς έχει μια πυκνότητα 3 έως 3.1 gr/cm^3, ενώ ο φλοιός των ηπείρων έχει μια πυκνότητα 2.7 έως 2.8 gr/cm^3. Τόσο το πάχος του φλοιού όσο και η πυκνότητά του μας δείχνουν ότι το τμήμα αυτό του πλανήτη μας έχει μια πολύ μικρή συνεισφορά στη συνολική του μάζα και συγκεκριμένα είναι το 0.5% αυτής. Τα πιο παχιά τμήματα του στερεού φλοιού υπάρχουν κάτω από μεγάλους ορεινούς όγκους. Ο ωκεάνειος φλοιός είναι, πάντως, πιο πυκνός από τον ηπειρωτικό φλοιό. Επομένως ο ηπειρωτικός φλοιός δέχεται μεγαλύτερη άνωση.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι αν συγκρίνουμε το πάχος του στερεού φλοιού του πλανήτη μας με εκείνο των γειτονικών πλανητών διαπιστώνουμε ότι, αν λάβει κανένας υπόψη του το μέγεθός του, είναι σχετικά πολύ λεπτός. Είναι ακόμη πιο λεπτός, αναλογικά, και από αυτόν της Σελήνης. Η Γη μας, λοιπόν, δεν είναι καθόλου χοντρόπετση, αλλά, αντίθετα, έχει το πιο λεπτό δέρμα. Κάνοντας συγρίσεις με τους άλλους πλανήτες θα περίμενε κανένας ο φλοιός της Γης να έχει ένα πάχος τουλάχιστον 200 km. Φαίνεται, ότι το πάχος που έχει στην πραγματικότητα ο φλοιός της Γης είναι αποτέλεσμα των υλικών που τον αποτελούν, της μέσης θερμοκρασίας και πίεσης στην επιφάνεια, του μεγέθους του πλανήτη μας, και της σύστασης του εσωτερικού του.

Ας δούμε λίγο πιο αναλυτικά το σημείο αυτό. Ο βασάλτης, ένα από τα πιο άφθονα ορυκτά του στερεού φλοιού, σε μικρές πιέσεις και σε θερμοκρασίες πάνω από το σημείο τήξης του έχει μικρή πυκνότητα. Έτσι, λοιπόν ανεβαίνει προς την επιφάνεια. Όταν όμως, είναι κρύος και βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο των 50 km περίπου στο μανδύα μετασχηματίζεται σε ένα πιο πυκνό πέτρωμα, το οποίο ονομάζεται εκλογίτης. Έτσι, ένας όγκος βασάλτη που προσπαθεί να ανέλθει κάτω από μια παχιά και κρύα λιθοσφαιρική πλάκα με πάχος μεγαλύτερο από 50 km λόγω της μικρής αρχικής του πυκνότητας, μετασχηματίζεται σε εκλογίτη, αποκτά μεγάλη πυκνότητα, και ξαναβυθίζεται στο μανδύα.

Έτσι, λοιπόν, η βάση ενός κρύου φλοιού με πάχος μεγαλύτερο των 50 km θα γινόταν πυκνός εκλογίτης και θα ήταν πια όχι φλοιός αλλά πυκνός μανδύας που θα βυθιζόταν και πάλι προς τα κάτω, αφού η άνωση θα ήταν μικρότερη από το βάρος του. Αυτό θα είχε σαν συνέπεια ο φλοιός να μην μπορεί να αποκτήσει μεγάλο πάχος, μιας και τα πιο βαθιά του τμήματα θα βυθίζονταν στο μανδύα. Βέβαια, ο βασάλτης μπορεί να φτάσει μέχρι την επιφάνεια αν κρυώσει σε βάθη αισθητά μικρότερα των 50 km, όπως συμβαίνει στις μεσοωκεάνειες ράχεις και σε ηφαιστειακές εκρήξεις.

Εάν τώρα η επιφανειακή θερμοκρασία της Γης ήταν τόσο υψηλή όσο στην Αφροδίτη, η λιθόσφαιρα θα ήταν κι' αυτή αρκετά ζεστή και με μικρότερη πυκνότητα, και έτσι θα επέπλεε μάλλον συνέχεια, χωρίς να βυθίζεται στο μανδύα, όπως γίνεται τώρα με τα τμήματα των λιθοσφαιρικών πλακών που βυθίζονται. Η υψηλή θερμοκρασία θα είχε επίσης ως αποτέλεσμα ο μετασχηματισμός του βασάλτη σε εκλογίτη να γίνεται σε μεγαλύτερα βάθη, στα οποία, όμως, ο βασάλτης θα έλιωνε πια και θα ανέβαινε προς την επιφάνεια. Έτσι θα μπορούσε να υπάρξει ένας αρκετά παχύς στερεός φλοιός, χωρίς να έχει προβλήματα άνωσης. Ίσως, πράγματι, αυτό να συνέβαινε τα πρώτα χρόνια στην ιστορία σχηματισμού του στερεού φλοιού της Γης όταν η επιφανειακή της θερμοκρασία ήταν πολύ πιο υψηλή απ' ότι σήμερα. Στη Σελήνη τέλος, λογω του μικρού της μεγέθους, ο

μετασχηματισμός του βασάλτη σε εκλογίτη δεν γίνεται ποτέ, και έτσι μπορούμε και εκεί να έχουμε έναν παχύ βασλατικό φλοιό που καλύπτει το εσωτερικό της.

Από μελέτες και πάλι των σεισμικών κυμάτων αποδείχτηκε ότι ο στερεός φλοιός παρουσιάζει σε βάθος περίπου 12 - 16 km μια μικρή ασυνέχεια, η οποία ονομάστηκε "ασυνέχεια Conrad". Άρα λοιπόν μπορούμε να τον χωρίσουμε σε δυο στρώματα. Το ανώτερο στρώμα ονομάζεται γρανιτοειδές ή στρώμα Sial, από τα σύμβολα των στοιχείων που κύρια το αποτελεούν, πυρίτιο (Si) και αργίλιο (Al). Τα πετρώματα που σχηματίζουν τα δυο αυτά στοιχεία στο στρώμα αυτό είναι κυρίως γρανιτικά. Το δεύτερο στρώμα ονομάζεται βασαλτοειδές ή στρώμα Sima, από τα σύμβολα των στοιχείων που κύρια το αποτελούν, πυρίτιο (Si) και μαγνήσιο (Mg).

Ο ωκεάνειος φλοιός, όπως είδαμε, δημιουργείται συνεχώς στος μεσοωκεάνειες ράχεις, και επομένως είναι γενικά πιο νέος από τον ηπειρωτικό φλοιό. Πιο συγκεκριμένα, ο πιο παλιός ωκεάνειος φλοιός έχει μια ηλικία γύρω στα 200 εκατομμύρια χρόνια. Αντίθετα ο πιο παλιός ηπειρωτικός είναι 3.8 δισεκατομμυρίων χρόνων (Γροιλανδία). Καλύπτει δηλαδή το 85% της γήινης ιστορίας. Ο ηπειρωτικός φλοιός βρίσκεται, όπως λέει το όνομά του άλλωστε, κάτω από τις ηπείρους και τα όριά τους, αλλά και κάτω από μικρές αβαθείς ωκεάνειες περιοχές. Καλύπτει συνολικά το 45% της γήινης επιφάνειας, δηλαδή αρκετά πιο πολύ απ' ότι οι ήπειροι. Να σημειώσουμε δε ότι ο ωκεάνειος φλοιός διαφέρει και ως προς τις χημικές και φυσικές του ιδιότητες από τον ηπειρωτικό.

Αν μείνουμε στον ηπειρωτικό φλοιό, διαπιστώνουμε ότι τα πιο παχιά τμήματά του βρίσκονται κάτω από τις μεγάλες οροσειρές, όπως τα Ιμαλάϊα, οι Άνδεις κ.λ.π. ενώ τα πιο λεπτά τμήματά του βρίσκονται σε περιοχές που είναι στο επίπεδο της θάλασσας. Αυτό, σε συνδυασμό με το ότι, όπως αναφέραμε στην αρχή, ο ωκεάνειος φλοιός είναι πολύ πιο λεπτός από τον ηπειρωτικό, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πάχος του φλοιού είναι συνάρτηση της μάζας που κουβαλάει. Με όρους υδροστατικής αυτό είναι κατανοητό, μιας και ο φλοιός επιπλέει κατά κάποιο τρόπο στον πιο πυκνό μανδύα, όπως επιπλέει ένα παγόβουνο στο νερό. Ανάλογα με τη μάζα του παγόβουνου η βύθισή του θα είναι

μικρή ή μεγάλη, ώστε να υπάρχει μικρή ή μεγάλη άνωση αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό το αποκαλούμε ισοστατική ισορροπία, όπως είπαμε.

Η Βόρεια και η Νότια Ευρώπη έχουν αρκετές διαφορές στο πάχος του φλοιού τους. Κάτω από τη Σκανδιναυία ο φλοιός έχει ένα πάχος 40 με 50 km, ενώ κάτω από τη Δυτική Ευρώπη το πάχος του φλοιού μόλις και φτάνει τα 30 km. Θα πρέπει δε να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω διαφορές δεν ερμηνεύονται από τη θεωρία της ισοστασίας. Ετσι λοιπόν το πάχος του στερεού φλοιού είναι μάλλον ένα πιό πολύπλοκο φαινόμενο απ' ότι αρχικά είχεθεωρηθεί.

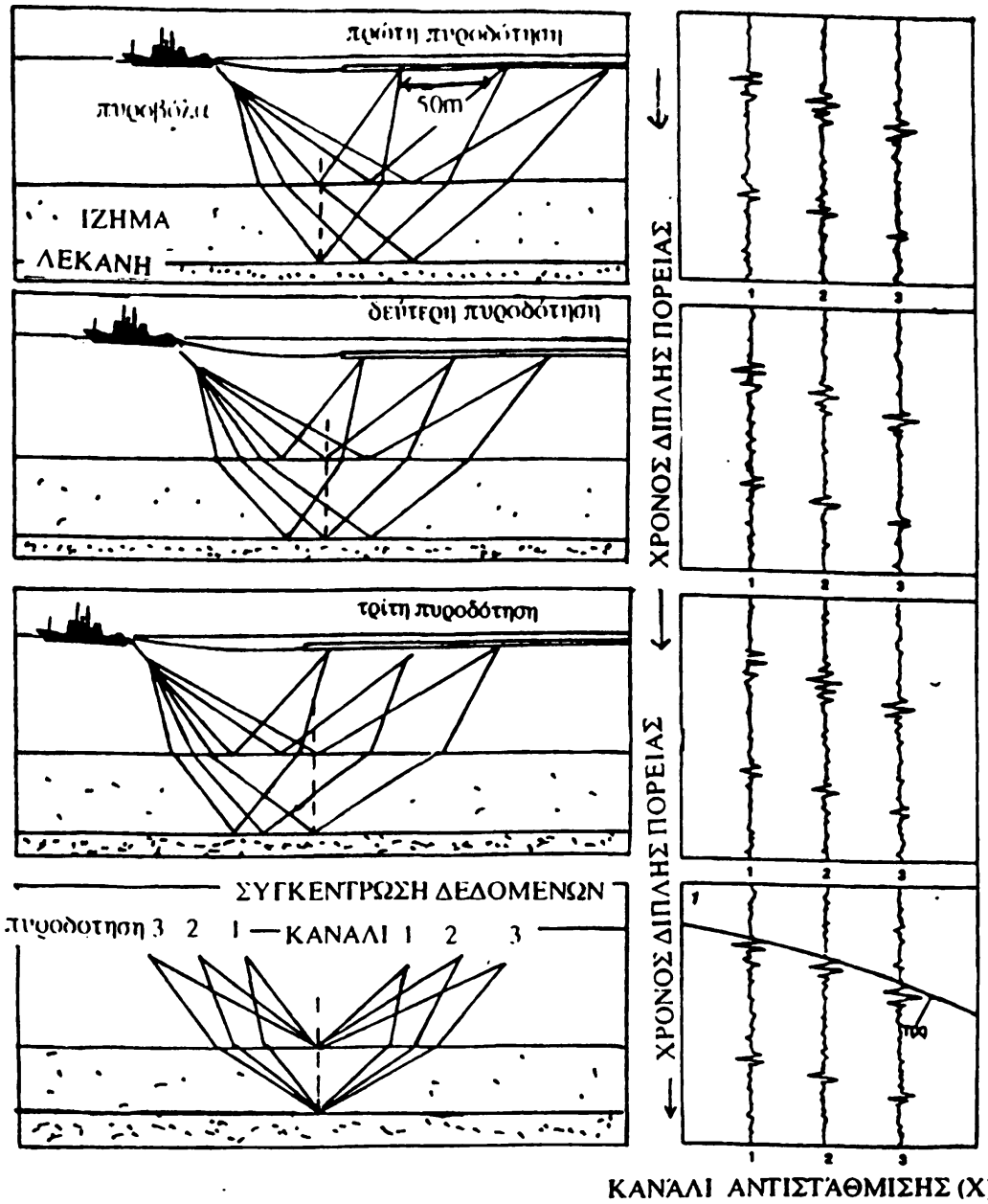
Ενώ όπως είδαμε η τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών εξηγεί το σχηματισμό του ωκεάνειου φλοιού, δεν συμβαίνει το ίδιο και με το σχηματισμό των ηπείρων. Το μόνο που ξέρουμε με σιγουριά για τις τελευταίες είναι ότι τα επιφανειακά τους τμήματα αναδιπλώνονται και ανακατανέμονται από τις κινήσεις των πλακών. Ξέρουμε επίσης, ότι παρ' ότι είναι τόσο παλιές, εντούτοις δεν είναι το πρώτο και αρχικό στερεό κάλυμμα της Γης που σχηματίστηκε σε κάποια φάση της ιστορίας της μετά την πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας, αλλά είναι αποτέλεσμα μετέπειτα διεργασιών. Έτσι, αρχικά, θεωρούνταν ότι οι ήπειροι σχηματίστηκαν στην ουσία κατά τη διάρκεια μιας μόνο διεργασίας, η οποία συνέβηκε περίπου 4 δισεκατομμύρια χρόνια πριν. Στη συνέχεια, βέβαια, θεωρούνταν ότι υπήρξαν αρκετά επεισόδια ανακύκλωσης του ηπειρωτικού φλοιού και αλληλεπίδρασής του χημικά με το μανδύα, αλλά το βασικό επεισόδιο πίστευαν ότι ήταν ένα. Αργότερα, όμως, είδαν το φως της δημοσιότητας άλλες θεωρίες, οι οποίες διατύπωναν την άποψη ότι οι σημερινές ήπειροι είναι δομές που προέκυψαν από πολλές και σημαντικές ανακατατάξεις της επιφάνειας της Γης, που συνέβηκαν πολύ πριν αυτές αποκτήσουν τη σημερινή τους μορφή. Έτσι, ο πρώτος ηπειρωτικός φλοιός σχηματίστηκε πράγματι πριν από 4 δισεκατομμύρια χρόνια, αλλά με διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό. Το μέγιστο του ρυθμού αυτού πρέπει, σύμφωνα με όλες τις ενδείξεις, να παρατηρήθηκε ανάμεσα στα 2.5 με 3 δισεκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα. Πρόσφατα, μάλιστα, μια ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου του MIT στις ΗΠΑ κατάφερε να αποδείξει ότι ο

σχηματισμός των ηπείρων είναι αποτέλεσμα πολλών διαφορετικών μεταξύ τους επεισοδίων χημικής διαφοροποίησης των τμημάτων του πλανήτη μας. Σε σχέση με τη μάζα τους, οι ήπειροι συνεισφέρουν μόνο το 0.4% στη γήινη μάζα.

Η σύσταση του στερεού φλοιού είναι περισσότερο καλά γνωστή απ' ότι αυτή των δυο άλλων τμημάτων. Αυτό οφείλεται στο ότι πολλές περιοχές του φλοιού υπόκεινται σε άμεση παρατήρηση μέσα από βαθιές γεωλογικές τρύπες, που ανοίγονται είτε για επιστημονικούς είτε για οικονομικούς λόγους, και κυρίως για την εκμετάλευση των κοιτασμάτων πετρελαίου. Η πιο βαθιά τέτοια τρύπα στον ηπειρωτικό φλοιό έχει βάθος 12 km και βρίσκεται στο νησί Kola της Σοβιετικής Αρκτικής, όπως είπαμε, ενώ η πιο βαθιά τρύπα στον ωκεάνειο φλοιό έχει μήκος 1 km, κάτω από το βυθό του ωκεανού.

Γενικά, ο ωκεάνειος φλοιός αποτελείται από πυριγενή βασαλτικά πετρώματα κυρίως, ενώ ο ηπειρωτικός φλοιός αποτελείται από γρανιτικά πυριγενή μεταμορφωσιγενή και ιζηματογενή πετρώματα, εμπλουτισμένα με διάφορα στοιχεία, όπως κάλιο, φθόριο, ουράνιο και πυρίτιο. Η σημαντική διαφορά ανάμεσα στα πετρώματα όλης της υπόλοιπης Γης και του φλοιού είναι ότι τα πρώτα είναι πιο φτωχά σε πυρίτιο (Si), αλλά είναι πιο πλούσια σε σίδηρο και μαγνήσιο, ενώ τα δεύτερα έχουν περισσότερο ασβέστιο (Ca), αλουμίνιο (Al), σόδιο (Sd), κάλιο (K), και βέβαια πυρίτιο (Si). Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο στερεός φλοιός φτιάχτηκε από το "ξάφρισμα" των σκουπιδιών που υπήρχαν στη ζεστή Γη, και τα οποία κάποτε πάγωσαν και στερεοποιήθηκαν.

Τα πετρώματα που αποτελούν τον ηπειρωτικό φλοιό χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία δεν βρίσκεται παντού, αλλά όπου υπάρχει βρίσκεται πάνω από τη δεύτερη κατηγορία, και χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες. Έτσι, από τη μια μεριά περιλαμβάνει πολύ εκτετεμένες συσωρεύσεις ιζηματογενών και ηφαιστειακών πετρωμάτων που δεν έχουν υποστεί σχεδόν καμιά παραμόρφωση, και από την άλλη μεριά μακρές παραμορφωμένες ζώνες πυριγενών ιζηματογενών και μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων. Οι τελευταίες βέβαια δεν είναι άλλες από τις ορογενετικές ζώνες. Η δ εύτερη



Μιά εικόνα του Στερεού Φλοιού κάτω από τους ωκεανούς μπορούμε να αποκτήσουμε εξετάζοντας την ανάκλαση ηχητικών κυμάτων, τα οποία παράγονται από την πυροδότηση πυροβόλων όπλων. Τα ανακλώμενα κύματα συλλαμβάνονται από κατάλληλα υδρόφωνα. Κάθε υδρόφωνο καταγράφει τόσο κύματα που ανακλώνται από το επάνω μέρος των ωκεάνειων ιζημάτων όσο και κύματα που ανακλώνται από τα πετρώματα που βρίσκονατι κάτω από τα ιζήματα. Δείχνεται μιά τέτοια τυπική καταγραφή τριών υδροφώνων.

Σχήμα 32

κατηγορία φτιάχνει το κύριο μέρος του ηπειρωτικού φλοιού και αποτελείται από μια μεγάλη ποικιλία πετρωμάτων, κάτι που την φέρνει σε πλήρη αντίθεση με τη σχεδόν ομοιόμορφη σύσταση του ωκεάνειου φλοιού. Χωρίζεται σε διαφορετικές ζώνες, καθεμιά από τις οποίες αντιπροσωπεύει και ένα διαφορετικό τμήμα της γήινης ιστορίας, και για να δημιουργηθεί απαιτήθηκαν μέχρι και πολλές εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Η ηλικία δε παρακείμενων ζωνών μπορεί να διαφέρει παραπέρα κατά μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια ή και δισεκατομμύρια χρόνια.

Όπως έχουμε 'πεί, ο πιο παλιός στερεός φλοιός βρίσκεται στη Γροιλανδία και έχει ηλικία 3.8 δισεκατομμύρια χρόνια. Άλλα παλιά πετρώματα στο γήινο φλοιό είναι στα εξής μέρη. Στην ακτή του Labrador στον Καναδά (3.6 δισ. χρόνια), στη Β. Νορβηγία (3.5 δισ. χρόνια), στη Ν. Αφρική (3.6 δισ. χρόνια) και στον ποταμό Minnesota στις ΗΠΑ (3.6 δισ, χρόνια). Αξίζει να σημειώσουμε ότι ο Καναδάς, όπου ανακαλύφθηκαν τα πρώτα από τα παραπάνω πετρώματα, ήταν κάποτε ενωμένος με τη Γροιλανδία, και ότι χωρίστηκε απ' αυτή πριν από 60 εκατομμύρια χρόνια. Οι παραπάνω τιμές για πετρώματα του στερεού φλοιού μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι 800 εκατομμύρια χρόνια μετά το σχηματισμό του πλανήτη μας ο ηπειρωτικός φλοιός είχε σχηματιστεί, και παραπέρα ότι το εσωτερικό της Γης είχε σταθεροποιηθεί κατά κάποιον τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι ο πυρήνας και ο μανδύας είχαν πια ξεχωρίσει μεταξύ τους.

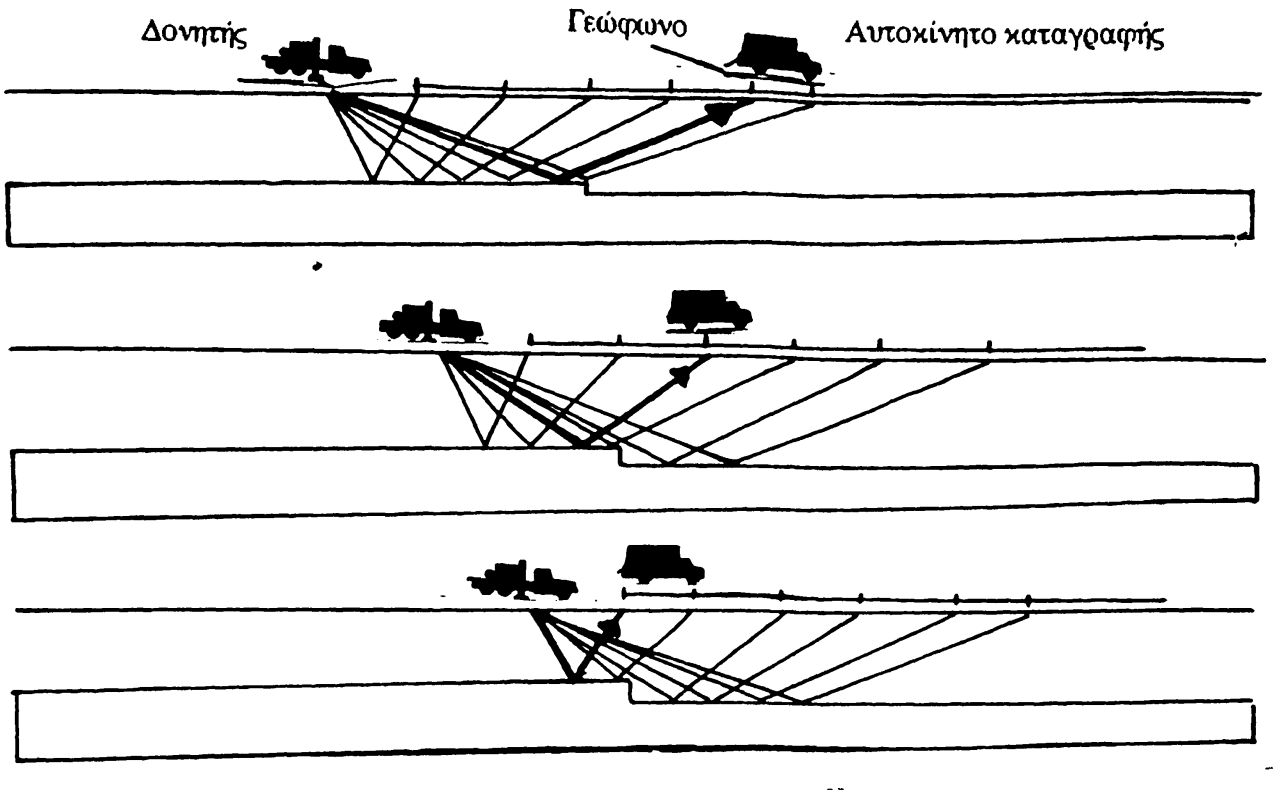
Ανακεφαλαιώνοντας θα μπορούσαμε να πούμε ότι σε σχέση με το στερεό φλοιό του πλανήτη μας, σημαντικά ερωτήματα που παραμένουν αναπάντητα είναι και τα εξής. Τι συνέβηκε στο στερεό φλοιό της Γης τα 0.8 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια που μας λείπουν στη μελέτη της ιστορίας του πλανήτη μας; Πότε ακριβώς η θερμοκρασία της γήινης επιφάνειας ήταν τέτοια που της επέτρεψε να αρχίσει να στερεοποιείται; Ήταν ο πρώτος στερεός φλοιός της Γης μια σταθερή επιφανειακή κατάσταση, ή γιγαντιαίες ανακατατάξεις τον κατέστρεψαν για να μας δώσουν έναν άλλο (το σημερινό;) πιο σταθερό; Πότε άρχισε η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών κάτω από ποιες συνθήκες και πόσο η αρχική κίνηση έμοιαζε με τη

σημερινή; Τα ερωτήματα αυτά, όπως και πολλά άλλα, είναι πολύ δύσκολο αν όχι ακατόρθωτο να απαντηθούν μόνο με τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας ή θα αποκτήσουμε, από παρατηρήσεις του πλανήτη μας. Άλλωστε 0.8 δισεκατομμύρια χρόνια χαμένης ιστορίας δεν είναι καθόλου μικρό διάστημα. Μόνο άλλες πηγές έξω από τη Γη μπορούν να μας βοήσουν στο σημείο αυτό. Πού είναι όμως αυτές;

Ας έρθουμε τώρα να συζητήσουμε τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη των ιδιοτήτων του στερεού φλοιού. Κατ' αρχάς οι ιδιότητες του στερεού φλοιού μπορούν εύκολα να ανιχνευτούν με ηχητικές πηγές. Οι πηγές αυτές εκπεμπουν ένα ηχητικό κύμα μεγάλης σχετικά ενέργειας, το οποίο διαδίδεται στο στερεό φλοιό και υφίσταται διαδοχικές ανακλάσεις και διαθλάσεις από τις διαφορετικής σύστασης περιοχές πετρωμάτων που συναντά. Συλλαμβάνοντας τα ανακλώμενα κύματα, είναι σχετκά εύκολο να υπλογίσει κανένας την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στις διάφορες περιοχές. Από εργαστηριακά πειράματα στη συνέχεια, είναι δυνατόν να αποκτήσει μια εικόνα ο ερευνητής για το είδος του πετρώματος που διαδίδει τον ήχο, ανάλογα με την τιμή που βρήκε. Η μέθοδος, μάλιστα, αυτή χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια για την ανακάλυψη κοιτασμάτων πετρελαίου. Ειδικά για τις υποθαλάσσιες έρευνες, όπου οι γεωτρήσεις είναι αρκετά δύσκολες, η παραπάνω μέθοδος είναι πολύ χρήσιμη.

Οι ηχητικές πηγές που συνήθως χρησιμοποιούνται στις υποθαλάσσιες έρευνες είναι εκρήξεις ή πυροβόλα όπλα. Η συχνότητα αυτών των πηγών κυμαίνεται από 6 Hertz (κύκλους ανά δευτερόλεπτο) έως 60 Hertz. Βέβαια, η ενέργεια του ηχητικού κύματος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, μιας και η πρόθεση των ερευνητών είναι ο ήχος να φτάσει μέχρι και την ασυνέχεια Moho. Συνήθως χρησιμοποιείται μια συστοιχία σχετικά μικρών όπλων και όχι ένα μεγάλο πυροβόλο, επειδή ένα μικρό όπλο βγάζει έναν πολύ πιο οξύ ήχο. Η συστοιχία πυροδοτείται ταυτόχρονα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συνήθως ανά 20 sec, ώστε να συγκεντρώσει κανένας πολλά πειραματικά δεδομένα. Με 30 έως

50 τέτοια μικρά όπλα, ο παραγόμενος ήχος μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 15 km μέσα στο στερεό φλοιό.



Οπως και στην περίπτωση του σχήματος 32, το ίδιο μπορεί να γίνει και στη στεριά με τη βοήθεια δυό φορτηγών. Το ένα κουβαλά ένα δονητή, ο οποίος παράγει κύματα, και το άλλο καταγράφει τα ανακλώμενα κύματα μέσω ενός συστήματος γεωφώνων.

Σχήμα 33

Ειδικά για τις υποθαλάσσιες έρευνες θα πρέπει να λάβει κανένας υπόψη του και το διάστημα που χρειάζεται ο ήχος για να φτάσει μέχρι τον πυθμένα. Η ταχύτητα του ήχου στο νερό είναι 1500 m/sec. Στα αμέσως κάτω από τον πυθμένα πετρώματα η ταχύτητα αυτή παίρνει τιμές από 1500 έως 2200 m/sec, στη συνέχεια η τιμή της φτάνει τα 4500 m/sec, σε ακόμη πιο μεγάλα βάθη φτάνει τα 6700 m/sec, και λίγο πριν την ασυνέχεια Moho παίρνει την τιμή 8100 m/sec. Το πάχος των

πετρωμάτων που δίνει τις διαφορετικές τιμές εξαρτιέται από την περιοχή στην οποία κάνει κανένας την έρευνα. Τελευταία, η σύσταση του ωκεάνειου φλοιού ανιχνεύεται και με κατάλληλα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία μετρούν την ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Αυτή όπως ξέρουμε είναι εκτός των άλλων συνάρτηση και του υλικού μέσα από το οποίο διαδίδονται τα κύματα αυτά. Έτσι, μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μας δίνουν μια πολύ καλή εικόνα για τη χημική σύσταση του ωκεάνειου φλοιού.

Σημαντικές έρευνες για τον ηπειρωτικό στερεό φλοιό έχει κάνει και το Consortium for Continental Reflecting Profiling (COCORP) στην αναζήτηση (τι άλλου) πετρέλαιου. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η εξής. Τέσσερα ή πέντε μεγάλα φορτηγά εξοπλισμένα με επιστημονικά όργανα και κυρίως με δονητές είχαν τη δυνατότητα να"σαρώνουν" επιφανειακά μια μεγάλη περιοχή. Οι δονητές κατηύθυναν προς το έδαφος ένα σήμα του οποίου η συχνότητα μεταβαλόταν κατά συνεχή τρόπο από 8 Hz μέχρι 32 Hz. Η μεταβολή της συχνότητας κρατούσε 30 sec, και έτσι ο παραγόμενος ήχος έμοιαζε με τερέτισμα πουλιού. Μετά από 30 sec τα φορτηγά άλλαζαν θέση και επαναλάμβαναν και πάλι για πολλές φορές την όλη διαδικασία. Τα κύματα που έστελναν οι δονητές στο έδαφος ταξίδευαν σ' αυτό γύρω στα 20 sec, που σημαίνει ότι έφταναν μέχρι το βάθος των 60 με 70 km. Τα ανακλώμενα κύματα συλλάμβαναν κατάλληλοι δέκτες και τα ανέλυαν ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Η όλη διαδικασία, λοιπόν, είχε τα χαρακτηριστικά μιας αξονικής τομογραφίας της Γης.

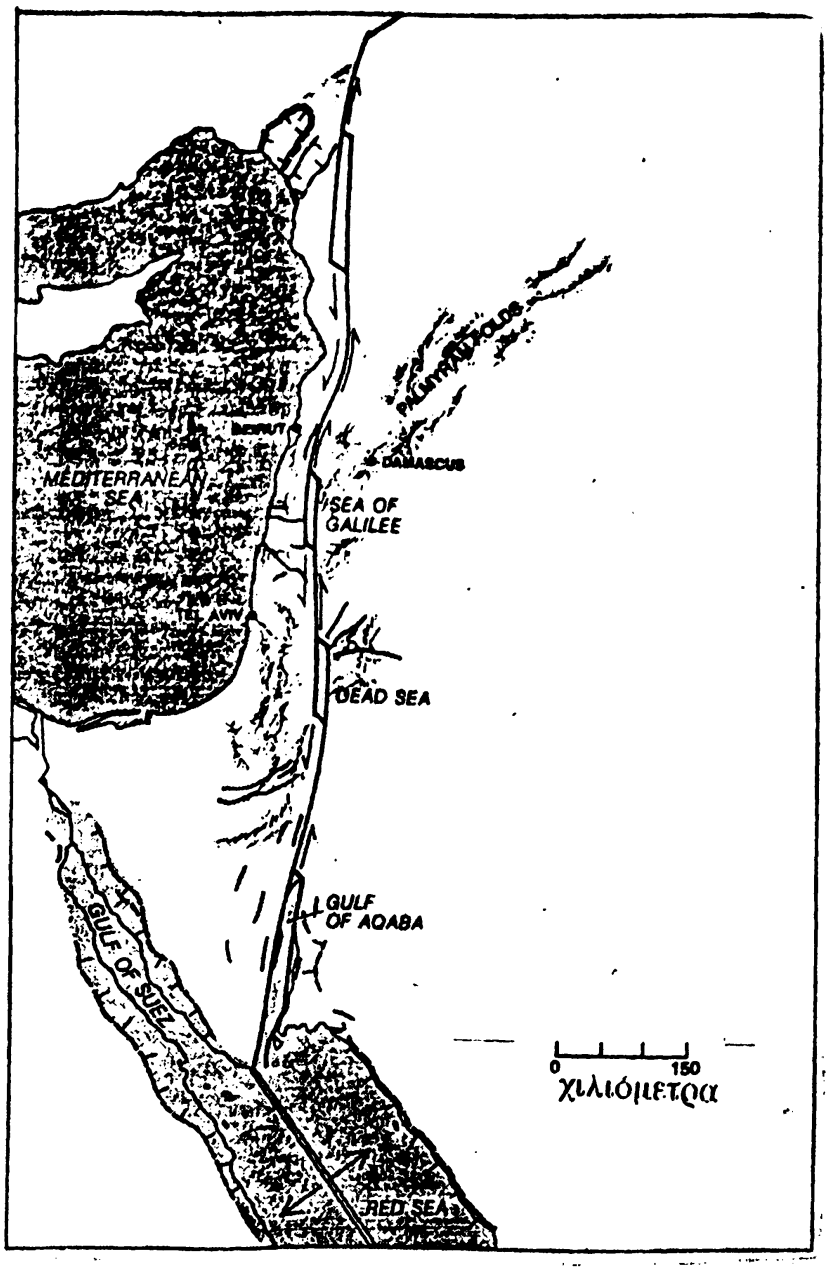
2.4.2. Η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών και ο φλοιός

Ας έρθουμε τώρα να συζητήσουμε τα διάφορα επακόλουθα της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών στο στερεό φλοιό του πλανήτη μας. Εξετάζοντας τις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών είπαμε προηγούμενα ότι δημιουργούν (εκτός από τους σεισμούς και τις ηφαιστειακές εκρήξεις) κάποια παρατηρήσιμα τεκτονικά

φαινόμενα στο στερεό φλοιό. Το πιο σημαντικό απ' αυτά είναι βέβαια οι ορογεννέσεις. Τα φαινόμενα αυτά θα τα συζητήσουμε τώρα κάπως πιο λεπτομερειακά. Ας αρχίσουμε με τα φαινόμενα που σχετίζονται με την απόκλιση δυο λιθοσφαιρικών πλακών.

Όταν δυο λιθοσφαιρικές πλάκες μετατοπίζονται η μια παράλληλα στην άλλη, η κίνησή τους αυτή μεταβιβάζεται μέχρι και το φλοιό. Οι κινήσεις του ηπειρωικού φλοιού που αντανακλούν μια τέτοια παράλληλη μετατόπιση εκτείνονται σε μια περιοχή που μπορεί να είναι αρκετά πλατιά. Έτσι, ζώνες του φλοιού που προϋπήρχαν και είχαν μια συγκεκριμένη διαμόρφωση αρχίζουν να ολισθαίνουν και αυτές πλευρικά, ενώ μερικά μέρη τους οδηγούνται ακόμη και σε περιστροφικές κινήσεις. Οι τελευταίες οφείλονται σε ένα ζεύγος δυνάμεων που ασκείται πάνω τους που έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ροπής. Τελικά πάντως η συνέχεια της περιοχής του φλοιού την οποία εξετάζουμε καταστρέφεται, και η εικόνα που αποκομίζουμε είναι σαν να πρόκειται για δυο ανεξάρτητα τμήματα ηπειρωτικού φλοιού. Δυο κλασικά τέτοια παραδείγματα είναι το ρήγμα Alpine στη Νέα Ζηλανδία και η ζώνη της Νεκράς θάλασσας.

Το πρώτο είναι το αποτέλεσμα της παράλληλης μετατόπισης της πλάκας του Ειρηνικού και της πλάκας του Ινδικού. Το δεύτερο δημιουργήθηκε με τον ίδιο τρόπο, από την παράλληλη μετατόπιση της Αραβικής και τηε Αφρικανικής πλάκας. Ο φλοιός στα ανατολικά του ρήγματος κινείται προς το βορά σε σχέση με το φλοιό που βρίσκεται δυτικά. Η σχετική μετατόπιση των δυο περιοχών έχει φτάσει σήμερα στα 105 km περίπου. Στο νοτιότερο τμήμα της ζώνης αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να ανοίξουν μια σειρά από λίμνες, θάλασσες και κόλποι, όπως η Νεκρά θάλασσα, η λίμνη της Γαλιλαίας και ο κόλπος της Ακαμπα. Επιπλέον, η πλευρική μετατόπιση δημιούργησε σε μερικά τμήματα συστολή του φλοιού και την εμφάνιση εδαφικών πτυχώσεων, που είχαν σαν αποτέλεσμα να σχηματιστούν τα υψώματα Palmyran.



Χαρακτηριστική περίπτωση πλευρικής ολίσθησης δυό λιθοσφαιρικών πλακών είναι αυτή της Αραβικής και της Αφρικανικής πλάκας. Στο στερεό φλοιό αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό της Νεκράς Θάλασσας, της λίμνης της Γαλιλαίας, του κόλπου της Ακαμπα, και των υψωμάτων Palmyran.

Σχήμα 34

Ας έρθουμε τώρα να εξετάσουμε τι συμβαίνει στα όρια δυο πλακών που απομακρύνονται. Στα όρια δυο τέτοιων πλακών ο ηπειρωτικός φλοιός είναι προφανές ότι επιμηκύνεται και γίνεται πιο λεπτός. Αρχικά αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανιστούν μια σειρά από εύθραυστα ρήγματα. Συχνά τα ρήγματα αυτά κάτω από την εμφάνιση ενός ζεύγους δυνάμεων περιστρέφονται και τέλος κατακάθονται. Εάν η απομάκρυνση των δυο πλακών συνεχιστεί, ανάμεσα στα δυο τμήματα του φλοιού που απομακρύνονται σχηματίζεται μια ευρεία περιοχή καθίζησης στην οποία εισχωρεί θαλασσινό νερό. Έχουμε δηλαδή τη δημιουργία δυο νέων ηπείρων εάν τα τμήματα που αποσπάζονται είναι μεγάλα, ή δυο νέων περιοχών ξηράς.

Μερικές φορές πάντως η απομάκρυνση των δυο τμημάτων του φλοιού σταματά μετά από μια επιμήκυνση του φλοιού κατά μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Έχουμε τότε μια σχισμένη ζώνη λεπτού ηπειρωτικού φλοιού, που μοιάζει σαν ο ηπειρωτικός φλοιός να απέκτησε μια ουλή. Τέτοια σχετικά πρόσφατα παραδείγματα είναι η κοιλάδα του Ρήνου, οι πεδιάδες της Ανατολικής Αφρικής, και η σχισμή του Rio Grante στη Νοτιοδυτική Αμερική. Πιο παλιά παραδείγματα είναι η σχισμή του Όσλο στη Νορβηγία, που έχει ηλικία 280 εκατομμυρίων χρόνων, η σχισμή του Koweenawan στις κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, που έχει ηλικία ενός δισεκατομμυρίου χρόνων κ.λ.π.

Στην περιοχή της Ανατολικής Αφρικής και της Αραβίας θα μείνουμε λίγο, μιας και εκεί υπάρχουν αυτή τη στιγμή σε ενέργεια μερικές από τις μεγαλύτερες σχισμές της Γης. Οι μεγάλες πεδιάδες που εκτείνονται από τη Μοζαμβίκη και τη Ζάμβια και Βόρεια της Αιθιοπίας απαρτίζουν μια ηπειρωτική σχισμή, στην οποία η διάρρηξη της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας δεν έχει ακόμη τελειώσει. Ο Κόλπος του Άντεν, από την άλλη μεριά, αποτελεί ένα σύστημα ωκεάνειου σχίσματος. Εκεί, υπάρχουν δυο μεγάλες ηπειρωτικές μάζες που απομακρύνονται, η Αραβία και η Αφρική, για πάνω από 10 εκατομμύρια χρόνια. Σ' όλο αυτό το διάστημα ζεστή λάβα από το μανδύα φτιάχνει καινούρια λιθοσφαιρική πλάκα. Το ίδιο συμβαίνει και στην Ερυθρά θάλασσα. Εκεί ένας καινούριος ωκεανός δημιουργείται, ο οποίος

αυτή τη στιγμή είναι στην εμβρυακή του ηλικία. Άρχισε να δημιουργείται πριν από 20 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Όπως πριν από πάρα πολλά χρόνια η Αμερική χωρίστηκε από την Ευρώπη και την Αφρική και ανάμεσά τους δημιουργήθηκε ο Ατλαντικός ωκεανός, έτσι θα χωριστεί μετά από πολλά χρόνια η Αφρική από την Ασία, και ανάμεσά τους θα ανοιχτεί ο Ερυθρός (;) ωκεανός.

Για την ακριβή διαδικασία που οδηγεί στην εμφάνιση μιας σχισμής στο στερεό φλοιό έχουν προταθεί δυο κυρίως μηχανισμοί. Σύμφωνα με τον πρώτο οι οριζόντιες κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών σπάζουν το στερεό φλοιό σε δυο κομμάτια που απομακρύνονται. Στο μηχανισμό αυτό η ασθενόσφαιρα παρακολουθεί τελείως παθητικά τα όσα συμβαίνουν, και απλά εάν η απομάκρυνση είναι τέτοια που να της επιτρέπει να ανέλθει, ανέρχεται και στερεοποιείται, δημιουργώντας νέο στερεό φλοιό. Σύμφωνα με το δεύτερο μηχανισμό η ασθενόσφαιρα δεν είναι πια παθητική, αλλά είναι αυτή που δημιουργεί την όλη κατάσταση. Έτσι, ακριβώς κάτω από τη σχισμή υπάρχει μια θερμική ασθενοσφαιρική ανωμαλία, κατά πάσα πιθανότητα μια καυτή κηλίδα, με θερμοκρασία μεγαλύτερη από τα άλλα υλικά του μανδύα στο ίδιο βάθος. Η κηλίδα αυτή ανέρχεται, διογκώνεται και δημιουργεί τις τάσεις που οδηγούν στο σπάσιμο του στερεού φλοιού.

Σε παλιότερες εποχές που συνέβηκαν πολλοί τέτοιοι χωρισμοί, σε κάθε νέο ηπειρωτικό χωρισμό έφθαναν στον ηπειρωτικό φλοιό εντυπωσιακά μεγάλες ποσότητες λάβας. Για παράδειγμα, ο Νότιος Ατλαντικός άρχισε να ανοίγει ανάμεσα στα νότια τμήματα δυο μεγάλων ηπειρωτικών μαζών περίπου 125 εκατομμύρια χρόνια πριν. Όπως ακριβώς ανοίγει ένα φερμουάρ, το χώρισμα ανάμεσα στις ηπείρους προχωρούσε σταθερά προς τα βόρεια και συμπληρώθηκε σε 5 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Σ' όλη τη διάρκεια αυτής της περιόδου μια θερμική ανωμαλία, η οποία ονομάζεται καυτή κηλίδα Walvis βρισκόταν ακριβώς κάτω από το κέντρο του ανοίγματος. Η μείωση της πίεσης του στερεού φλοιού πάνω από τη θερμική αυτή ανωμαλία επέτρεψε την άνοδο στην επιφάνεια εντυπωσιακά μεγάλων ποσοτήτων λάβας στην Αφρική και ακόμη μεγαλύτερων στη Ν. Αμερική

(ίσως και 2 εκατομμύρια km^3). Στην τελευταία, η λάβα γέμισε πεδιάδες βάθους μέχρι και 300 m πριν προχωρήσει στο εσωτερικό. Η μεγάλη αυτή ηφαιστειακή δραστηριότητα έφτασε σε ένα μέγιστο ανάμεσα στα 121 έως 120 εκατομμύρια χρόνια πριν και καθώς οι μεγάλες ηπειρωτικές μάζες χώριζαν συνεχώς η μια από την άλλη.

Στην ήπειρο Gondwana, (η οποία σχηματίστηκε από την ένωση της Ινδίας, της Αυστραλίας, της Ανταρκτικής, της Αφρικής και της Νότιας Αμερικής) πριν από 170 εκατομμύρια χρόνια ανάμεσα στην Αφρική και την Ανταρκτική εμφανίστηκε ένα ρήγμα, ακριβώς πάνω από μια ανώμαλη θερμική περιοχή, η οποία τώρα βρίσκεται στο νότιο Ινδικό ωκεανό. Και αυτή η διεργασία απελευθέρωσε μεγάλες ποσότητες λάβας, η οποία βρίσκεται τώρα στα όρια της Ανταρκτικής και έχει πάχος 10 km. Και η λάβα αυτή προχώρησε αρκετά στο εσωτερικό της ηπείρου.

Θα μπορούσε κανένας να υποθέσει ότι τα ρήγματα ανάμεσα σε μεγάλες ηπειρωτικές μάζες οφείλονται πάντα στην άνοδο προς τα πάνω τέτοιων ανώμαλων θερμικών μαζών του μανδύα; Σίγουρα, φαίνεται ότι οι θερμικές αυτές "φυσαλλίδες" πρέπει να παίζουν κάποιο ρόλο στη δημιουργία ρηγμάτων, αλλά περισσότερο σαν μηχανισμοί πυροδότησής τους και λιγότερο σαν οι κύριοι συντελεστές που τραβάνε τις ηπειρωτικές μάζες τη μια μακριά από την άλλη συνεχώς. Ενδέχεται η ανύψωση του ηπειρωτικού φλοιού πάνω από μια ζεστή φυσαλλίδα να διευκολύνει το γλύστριμα των ηπειρωτικών μαζών από τη μια και την άλλη μεριά, στη συνέχεια δε ο αποχωρισμός των μαζών να διευκολύνεται και να συντηρείται από θερμικά ρεύματα τα οποία δημιουργούνται λόγω αυτής της κανούριας διαμόρφωσης του ηπειρωτικού φλοιού. Έχει υπολογιστεί, πάντως, ότι κάθε φορά που δυο μεγάλες ηπειρωτικές μάζες αποχωρίζονται περίπου 10 εκατομμύρια km^3 λάβας ανέρχονται στην επιφάνεια, αυξάνοντας έτσι την ηπειρωτική επιφάνεια.

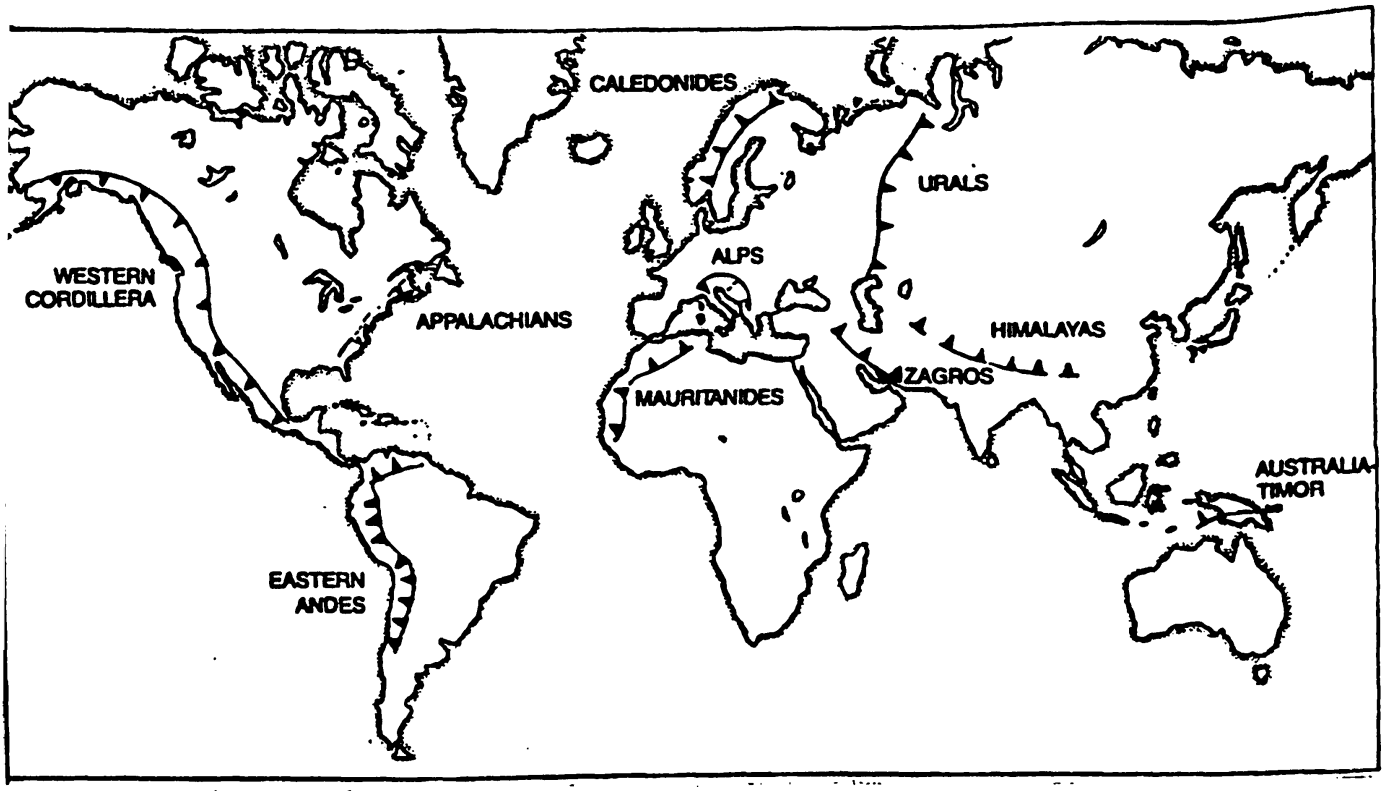
Για το τι συμβαίνει όταν η απόκλιση των δυο πλακών παρατηρείται κάτω από τους ωκεανούς, στις μεσοωκεάνιες ράχεις δηλαδή, μιλήσ με στα

προηγούμενα. Εδώ απλά θα σημειώσουμε ότι ο ωκεάνειος φλοιός δημιουργείται σχετικά γρήγορα στη γεωλογική κλίμακα και παραμένει άθικτος και χωρίς να υποστεί πολλές παραμορφώσεις. Στη συνέχεια καταστρέφεται και πάλι σχετικά γρήγορα. Αντίθετα ο ηπειρωτικός φλοιός δημιουργείται πιο αργά και υφίσταται μια σειρά από μεγάλες αλλαγές, που οφείλονται τόσο σε φυσικές όσο και σε χημικές διεργασίες, όπως και μια σειρά παραμορφώσεων. Επιπρόσθετα, ο ηπειρωτικός φλοιός ανθίσταται περισσότερο από τον ωκεάνειο σ' όλες εκείνες τις διεργασίες που τελικά τον καταστρέφουν.

Και τέλος ερχόμαστε στην τελευταία περιπτωση, της σύγκλισης δηλαδή δυο λιθοσφαιρικών πλακών. Από τις δυο πλάκες αυτή που οδηγεί σε παρατηρήσιμες αλλοιώσεις το στερεό φλοιό είναι αυτή που καλύπτει την άλλη. Η πλάκα αυτή, μετά τη σύγκρουση, μπορεί να υποστεί είτε έκταση, είτε συμπίεση, είτε να παραμείνει τελείως παθητική. Εάν υποστεί έκταση, τότε παρατηρούνται στο φλοιό φαινόμενα ανάλογα με αυτά που αναφέραμε στην περίπτωση της απόκλισης δυο πλακών. Ο φλοιός δηλαδή γίνεται πιο λεπτός και κατακάθεται. Μια τέτοια περίπτωση οδήγησε στο σχηματισμό του δικού μας Αιγαίου Πελάγους. Εάν η έκταση του φλοιού συνεχιστεί, τότε φτάνουμε μέχρι το σχηματισμό νέου ωκεάνειου φλοιού και αποκοπή τμημάτων ηπειρωτικού φλοιού από μεγάλα τμήματα ηπειρωτικού φλοιού. Τέτοιο παράδειγμα είναι ο σχηματισμός των νησιών της Ιαπωνίας που έχουν αποκοπεί από την Ασία, και χωρίζονται απ' αυτή με τη θάλασσα της Ιαπωνίας.

Εάν αντίθετα η πλάκα που είναι πάνω συμπιέζεται, τότε ο στερεός φλοιός αρχίζει να μειώνει το εμβαδόν του και να εμφανίζει πτυχώσεις, οι οποίες εάν είναι μεγάλες οδηγούν στην εμφάνιση οροσειρών. Οι πτυχώσεις μπορεί να καλύψουν μια ευρεία περιοχή του φλοιού, όπως για παράδειγμα στις Άνδεις, όπου καλύπτουν μια περιοχή μέχρι και 800 km πέρα από την τάφρο καταβύθισης. Ένα παράδειγμα μείωσης της επιφάνειας του στερεού φλοιού, έχουμε επίσης πάνω από την τάφρο όπου συγκλίνουν η Ασιατική πλάκα και η Αυστραλιανή. Έχει

υπολογιστεί ότι τα τελευταία 40 εκατομμύρια χρόνια το βορειότερο τμήμα της Αυστραλίας έχει συσταλεί κατά 300 km.



Οι πιό σημαντικές ορεινές αλυσίδες του πλανήτη μας.

Σχήμα 35

Εντυπωσιακά γεωλογικά φαινόμενα έχουμε επίσης από τη σύγκλιση της Ινδικής, της Αραβικής και της Αφρικανικής πλάκας με την Ευρασιατική πλάκα. Η σύγκλιση συμβαίνει κατά μήκος της ορεινής αλυσίδας των Ιμαλαΐων. Η ζώνη αυτή είναι και σήμερα ενεργή και στην ανατολική Μεσόγειο δημιουργεί γεωλογικά

φαινόμενα σε ένα πλάτος 500 km περίπου. Εκεί, τα γεωλογικά φαινόμενα υποδεικνύουν ότι υπάρχουν πολλές μικρές λιθοσφαιρικές πλάκες, απομεινάρια μεγάλων ηπειρωτικών πλακών. Η σύγκλιση επίσης της Ινδικής πλάκας και της Ασιατικής πλάκας πριν από 50 εκατομμύρια χρόνια οδήγησε σε εξαφάνιση περίπου 2.000 km της Ασίας, μέσα από αναδιπλώσεις του επιφανειακού της φλοιού. Πιο συγκεκριμένα, για να μπορέσει η Ασιατική πλάκα να ανταπεξέλθει στις συνθήκες που δημιουργούσε η σύγκρουση μίκρυνε κατά μήκος και μάκρυνε κατά πλάτος. Από την άλλη μεριά, η πίεση πάνω στην Ινδική πλάκα οδήγησε σε εντυπωσιακές αναδιπλώσεις του επιφανειακού της φλοιού, που μας έδωσαν το ορεινό συγκρότημα των Ιμαλαΐων, το πιο ψηλό δηλαδή ορεινό συγκρότημα της Γης. Οι πιέσεις που ασκούνται κατά τη διάρκεια των ορογεννέσεων είναι περίπου 1 gigapascal και οι θερμοκρασίες που αντιστοιχούν σ' αυτές τις πιέσεις είναι περίπου 1000 ^{o}C.

Η σύγκρουση της Ινδικής με την Ευρασιατική πλάκα είναι ένα σχετικά πρόσφατο συμβάν στη γεωλογική κλίμακα και μπορούμε να το μελετήσουμε με κάποια ακρίβεια. Τα τελευταία 40 εκατομμύρια χρόνια, η Ινδική πλάκα σπρώχνει προς τα βόρεια την Ευρασιατική πλάκα, προκαλώντας και μεγάλους σεισμούς και μεγάλες παραμορφώσεις του στερεού φλοιού. Πριν από τη σύγκρουση των δυο πλακών είχε προηγηθεί η διάλυση της Παγγαίας, και η Ινδική πλάκα διάνυσε περίπου 5.000 km πριν συναντήσει την Ευρασιατική πλάκα. Μετά τη σύγκρουση η Ινδική πλάκα συνέχισε να κινείται σπρώχνοντας την Ευρασιατική πλάκα για άλλα 2.000 km, συμπιέζοντας έτσι την τελευταία σε μια κατεύθυνση που βρίσκεται ανάμεσα στο Βορά-Νότο και Βορειοανατολικά-Νοτιοδυτικά. Λόγω της σύγκρουσης, η Ινδική πλάκα έχει μειώσει αρκετά την αρχική της ταχύτητα, και σήμερα ταξιδεύει με 5 cm το χρόνο. Συμπιέζοντας την Ευρασιατική πλάκα σήκωσε ορεινούς όγκους όπως τα Ιμαλάϊα, όπως είπαμε, μπροστά της, αλλά και σπρώχνει όγκους στερεού φλοιού από μπροστά της. Η ροή αυτή υλικών του στερεού φλοιού έχει ανοίξει μια σειρά από πεδιάδες κάθετα στην κατεύθυνση συμπίεσης, έτσι που κατά κάποιον τρόπο η Ινδία έχει μπεί σαν μια σφήνα στην

Ασία. Όπως, για παράδειγμα, συμπιέζεται ένα πλαστικό στρώμα από ένα σκληρό σώμα.

Για την ιστορία αξίζει να σημειώσουμε ότι αρχικά, πριν από την είσοδο στο παιχνίδι της θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών, οι ορογεννέσεις ερμηνεύονταν σαν το αποτέλεσμα της συστολής του στερεού φλοιού της Γης, καθώς αυτή έχανε θερμότητα και κρύωνε συνεχώς. Για τον ίδιο λόγο, δηλαδή, που αν αφήσουμε ένα μήλο να σαπίσει η συστολή του οδηγεί τον εξωτερικό του φλοιό σε ζαρώματα.

Υπάρχει επίσης περίπτωση δυο πλάκες οι οποίες αρχικά απέκλιναν, λόγω μεταβολής των θερμικών ρευμάτων του μανδύα να συγκλίνουν στη συνέχεια, και να δημιουργήσουν φαινόμενα που αναφέραμε παραπάνω. Χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι η εξής. Περίπου πριν από 1 δισεκατομμύριο χρόνια δυο ηπειρωτικές πλάκες στην περιοχή της Ρωσσίας απομακρυνόντουσαν η μια από την άλλη και ένας μεγάλος ωκεανός δημιουργήθηκε ανάμεσά τους. Η απομάκρυνση όμως αυτή σταμάτησε κάποτε, και ακόμη παραπέρα μετατράπηκε σε σύγκλιση. Ο ωκεανός που είχε δημιουργηθεί εξαφανίστηκε και περίπου πριν από 250 εκατομμύρια χρόνια οι δυο ηπειρωτικές πλάκες κόλλησαν η μια δίπλα στην άλλη. Η σύγκλιση συνεχίστηκε και οδήγησε σε μεγάλες επιφανειακές αναδιπλώσεις του φλοιού που δημιούργησαν τα Ουράλια όρη στην Κεντρική Ρωσσία. Σήμερα πάντως τα όρια σύγκλισης των δυο παραπάνω πλακών έχουν απομακρυνθεί από την περιοχή των Ουραλίων, και έτσι η περιοχή αυτή είναι αδρανής τελικά. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η σύγκλιση της Βόρειας Αμερικής και της Αφρικής, περίπου 250 εκατομμύρια χρόνια πριν. Η σύγκλιση αυτή οδήγησε στο σχηματισμό των νότιων Απαλάχιων. Αργότερα, η σύγκλιση μετατράπηκε σε απόκλιση και ανάμεσα στις δυο ηπειρωτικές μάζες ανοίχτηκε ο Ατλαντικός Ωκεανός.

Οι Αλπεις σχηματίστηκαν τα τελευτα 40 εκατομμύρια χρόνια. Είναι το αποτέλεσμα της σύγκρουσης των δυό απέναντι πλευρών ενός ωκεανού, καθώς αυτός μίκραινε και τελικά εξαφανίστηκε. Τα τελευταία 4ο εκατομμύρια χρόνια οι δυό πλευρές του ωκεανού έχουν συγκλίνει τουλάχιστον κατά 400 km. (Τιθύτς)

Εκτός όμως από τις σχετικά πρόσφατες περιπτώσεις ορογεννέσεων λόγω σύγκλισης δυο λιθοσφαιρικών πλακών υπάρχουν και οι λεγόμενες αρχαϊκές ορεινές ζώνες που είναι οροσειρές που δημιουργήθηκαν πριν από 2.5 με 3.8 δισεκατομμύρια χρόνια. Η πιο παλιά αρχαϊκή ζώνη είναι αυτή της Γροιλανδίας, που, όπως έχουμε 'πεί, δημιουργήθηκε πριν από 3.8 δισ. χρόνια. Οι οροσειρές αυτές παρουσιάζοιν σημαντικές διαφορές και ως προς τη σύσταση και ως προς τη δομή των πετρωμάτων τους από τις σχετικά νεότερες οροσειρές. Σίγουρα τα βουνά εκείνων των χρόνων δεν δημιουργόντουσαν στα όρια μεγάλων πλακών. Ο αρχαϊκός φλοιός ήταν λεπτός, λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο εσωτερικό της Γης, υπήρχε εκτεταμένη ηφαιστειακή δράση και κάποιες συγκρούσεις και σπρωξίματα ανάμεσα σε πολλές λεπτές μικρές πλάκες που άλλοτε θρυμματίζονταν και άλλοτε κολλούσαν η μια δίπλα στην άλλη. Έτσι λοιπόν μπορούμε να υποθέσουμε ή ότι οι αρχαϊκές ζώνες είναι αποτέλεσμα κινήσεων πλακών των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η ένταση ήταν διαφορετικά από ότι σήμερα, ή ότι η τεκτονική των πλακών δεν υπήρχε εκείνα τα χρόνια, και επομένως ένας άλλος γεωλογικός μηχανισμός που δεν παρατηρείται σήμερα δρούσε τα χρόνια εκείνα. Ίσως η αλήθεια είναι ότι αρχικά οι ηπειρωτικές μάζες ήταν μικρές και η τεκτονική των πλακών οφειλόταν σε κινήσεις μικρών τέτοιων μαζών. Με τον καιρό όμως, και μέσω ενός μηχανισμού του οποίου αγνοούμε τα βασικά χαρακτηριστικά, οι ηπειρωτικές μάζες αυξήθηκαν σημαντικά, έτσι ώστε πριν από 2.5 δισ. χρόνια να αρχίσουν να μας δίνουν τις μοντέρνες ορογεννέσεις.

Τεκτονικά φαινόμενα θα πρέπει να δημιουργήθηκαν, επίσης, και στα πρώτα στάδια σχηματισμού της Γης, όταν η θερμοκρασία της ήταν αρκετά υψηλή. Στην περίπτωση αυτή στην επιφάνεια της Γης υπήρχε ένας ωκεανός από λιωμένα υλικά, πάνω στον οποίο επέπλεαν σαν παγόβουνα βράχια με σχετικά υψηλό σημείο τήξης.

Όπως είπαμε και προηγούμενα ενώ για το σχηματισμό του ωκεάνειου φλοιού η τεκτονική θεωρία της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών μας δίνει

οριστικές απαντήσεις, για τον ηπειρωτικό φλοιό δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Έτσι, για τον τελευταίο αυτό υπάρχουν αρκετά αναπάντητα μέχρι σήμερα ερωτήματα. Μερικά από τα ερωτήματα που έχουν σχέση με το σχηματισμό του ηπειρωτικού φλοιού είναι και τα εξής. Πόσος μανδύας συμμετέχει στο σχηματισμό των ηπείρων; Η ηφαιστειακή λάβα που έρχεται από τα βάθη της Γης στην επιφάνεια σήμερα προέρχεται από ένα μανδύα που είναι σαφώς ξεχωρισμένος από τις άλλες περιοχές της Γης. Όμως κάποτε ερχόταν λάβα και από έναν όχι σαφώς ξεχωρισμένο μανδύα. Από πότε άρχισε να συμβαίνει το πρώτο, και για πόσο διάστημα συνέβαινε το δεύτερο; Σε ποιο στάδιο της γήινης ιστορίας άρχισε ο σχηματισμός του ηπειρωτικού φλοιού και με τι ρυθμό; Πόσο από το αρχικό υλικό των ηπείρων έχει ξαναεπιστρέψει στο μανδύα; Η πιο ολοκληρωμένη δουλειά που προσπαθεί να απαντήσει στα ερωτήματα αυτά και άλλα παρόμοια, στηρίζεται στην ανεύρεση θυγατρικών στοιχείων σε διάφορα μέρη του φλοιού, που είναι αποτέλεσμα ραδιενεργών διασπάσεων μητρικών στοιχείων. Γνωρίζοντας την αρχική θέση των μητρικών στοιχείων μπορούμε στη συνέχεια να βρούμε τον τρόπο με τον οποίον ανακατανεμήθηκαν στο φλοιό.

Για να έχει βέβαια κάποια αποτελέσματα μια τέτοια δουλειά, θα πρέπει οι χρόνοι ημιζωής των μητρικών στοιχείων να είναι συγκρίσιμοι με την ηλικία της Γης, δηλαδή τουλάχιστον αρκετές εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Τέτοια στοιχεία είναι το Rb-87, το K-40, το U-238 και U-235, το Th-232 και το Sm-147, που τα γνωρίσαμε στο εδάφιο 1.3. Μερικά από τα στοιχεία αυτά υπάρχουν σε σχετική αφθονία στο μανδύα και άλλα στο φλοιό. Έτσι, είναι δυνατόν πια από την ανίχνευση των θυγατρικών προϊόντων και των διασπάσεών τους να ανακαλύψουμε τις όποιες ανακατατάξεις έχουν συμβεί ανάμεσα σε υλικά του μανδύα, του ηπειρωτικού και του ωκεάνειου φλοιού. Επίσης, από μετρήσεις που έγιναν σε μετεωρίτες αλλά και στη γειτονική μας Σελήνη μπορούμε να εκτιμήσουμε το ποσοστό των παραπάνω στοιχείων που υπήρχε στο αρχικό νέφος που συμπηκνώθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

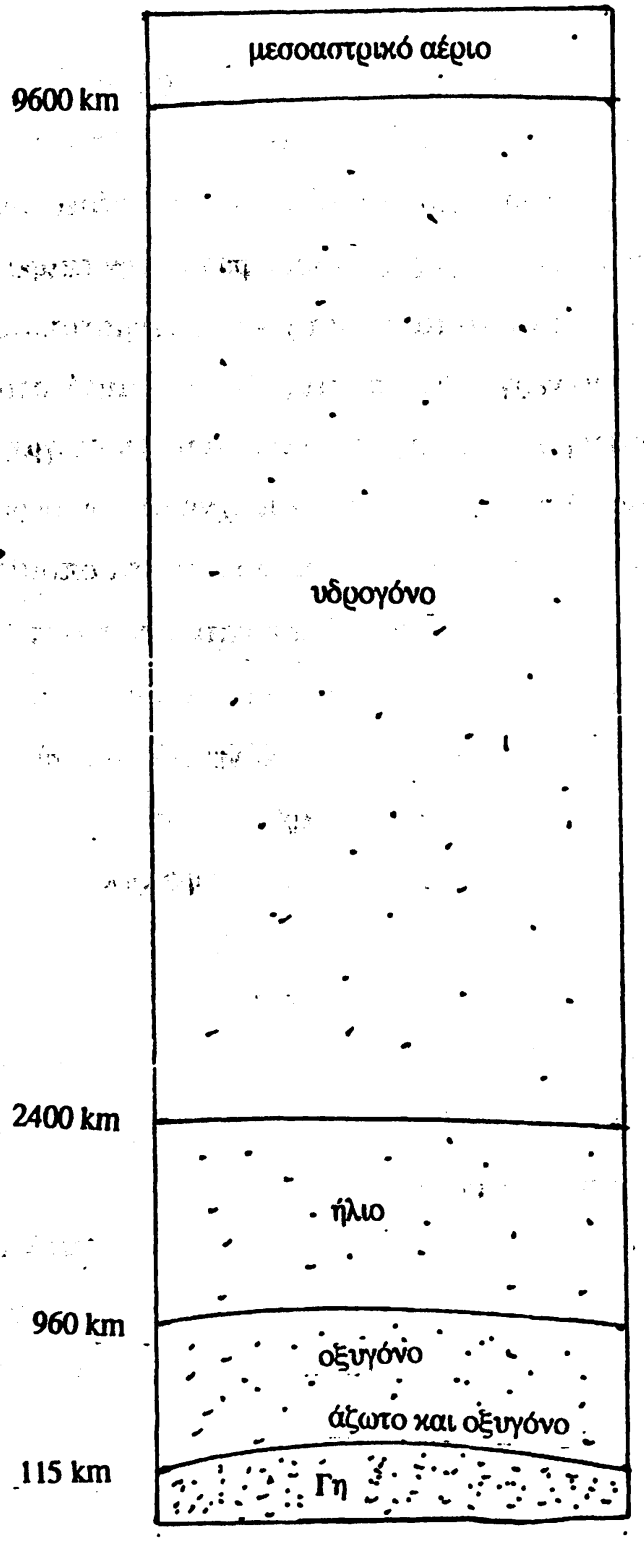
Η Γήινη ατμόσφαιρα

3.1 Η σύσταση

Αφού γνωρίσαμε τι υπάρχει κάτω από την επιφάνεια της Γης, στο εσωτερικό της, είναι καιρός να γνωρίσουμε και κάποια στοιχεία για ό,τι υπάρχει πάνω απ' αυτή, δηλαδή για την ατμόσφαιρά της. Στην ουσία η Γη είναι μια θερμική μηχανή που βρίσκεται κάτω από την επίδραση δυο πηγών θερμότητας. Του πυρήνα της και του Ηλιου. Το ρευστό της πρώτης πηγής είναι τα υλικά του μανδύα, ενώ το ρευστό της δεύτερης πηγής είναι η ατμόσφαιρα και οι ωκεανοί. Έτσι, με τους ανέμους η ηλιακή ενέργεια κατανέμεται σε διάφορους τόπους και ρυθμίζεται η θερμοκρασία στην επιφάνεια. Στην ουσία δε για μικρές χρονικές περιόδους, η σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα μαζί με τον απόσταση Γης-Ηλιου είναι οι δυο παράγοντες που καθορίζουν το ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας, από το οποίο στη συνέχεια εξαρτώνται όλες οι κλιματολογικές συνθήκες, από τη θερμοκρασία στην επιφάνεια έως την κυκλοφορία των ανέμων. Εάν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα, ο πλανήτης μας θα έβραζε την ημέρα και θα καταψύχονταν τη νύχτα.

Στην ατμόσφαιρα, όπως ξέρουμε, συμβαίνουν όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα που καθορίζουν τις κλιματολογικές συνθήκες του κάθε τόπου. Κι αυτό γιατί η ατμόσφαιρα είναι μια από τις τρεις μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης νερού, είτε με τη μορφή υδρατμών είτε σε σταγονίδια και παγοκρυστάλλους στα σύννεφα. Και όπως έχουμε 'πεί επανειλημμένα, η κατανομή του νερού στις τρεις μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσής του είναι το κύριο στοιχείο που ρυθμίζει τη μέση θερμοκρασία της Γης.

Μια ποσότητα ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα τη σημερινή εποχή έχει την εξής σύσταση. Στα 100 μόρια τα 79 είναι μόρια αζώτου (N), τα 20 οξυγόνου (O) και 1 αργού (Ar). Βέβαια οι παραπάνω αριθμοί είναι στρογγυλοποιημένοι, μιας και υπάρχουν και κάποιες μικρές ποσότητες άλλων αερίων. Συγκεκριμένα στο 1.000.000 μόρια υπάρχουν 340 μόρια διοξειδίου του άνθρακα (<u>προσοχή</u>: ο αριθμός αυτός είναι από τους πιο μεταβλητούς με συνεχή αύξηση με το χρόνο), 18 μόρια νέου, 5 μόρια ηλίου και περίπου 12 μόρια όζοντος (σε ύψος 25 km, όπου υπάρχει η μέγιστη συγκέντρωση του στοιχείου αυτού). Το N_2 είναι ένα σχεδόν αδρανές αέριο για όλες τις γεωχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στη Γη, γι' αυτό και υπάρχει μια διαρκής συσσώρευσή του. Το O_2 δημιουργήθηκε από τη φωτοσυνθετική λειτουργία των φυτών και βρίσκεται σε ένα διαρκή κύκλο, ενώ το Ar έχει κύρια ηφαιστειακή προέλευση. Συγκεκριμένα πρόκειται για το ισότοπο Ar-40 που προέρχεται από τη ραδιενεργή διάσπαση του K-40, το οποίο υπάρχει στο εσωτερικό της Γης (στο μανδύα) και έρχεται στον αέρα με την ηφαιστειακή λάβα. Το O_3 προέρχεται από αντίδραση ατομικού οξυγόνου με μοριακό οξυγόνο με τη βοήθεια της υπεριώδους ακτινοβολίας. Όπως είναι γνωστό, είναι το μόνο στοιχείο του ατμοσφαιρικού αέρα που απορροφά την καταστροφική για τους οργανισμούς υπεριώδη ακτινοβολία, και επομένως παίζει ένα εξίσου σημαντικό ρόλο, όπως και το O_2. Βέβαια το ελεύθερο όζον στην επιφάνεια του πλανήτη μας είναι επικίνδυνο για την υγεία. Έτσι, μόνο σαν ασπίδα είναι χρήσιμο το αέριο αυτό. Η ποσότητα πάντως του όζοντος όπως και αυτή του διοξειδίου του άνθρακα είναι μεταβλητή και εξαρτιέται από τον τόπο αλλά και από την εποχή του έτους. Στις μέρες μας δε

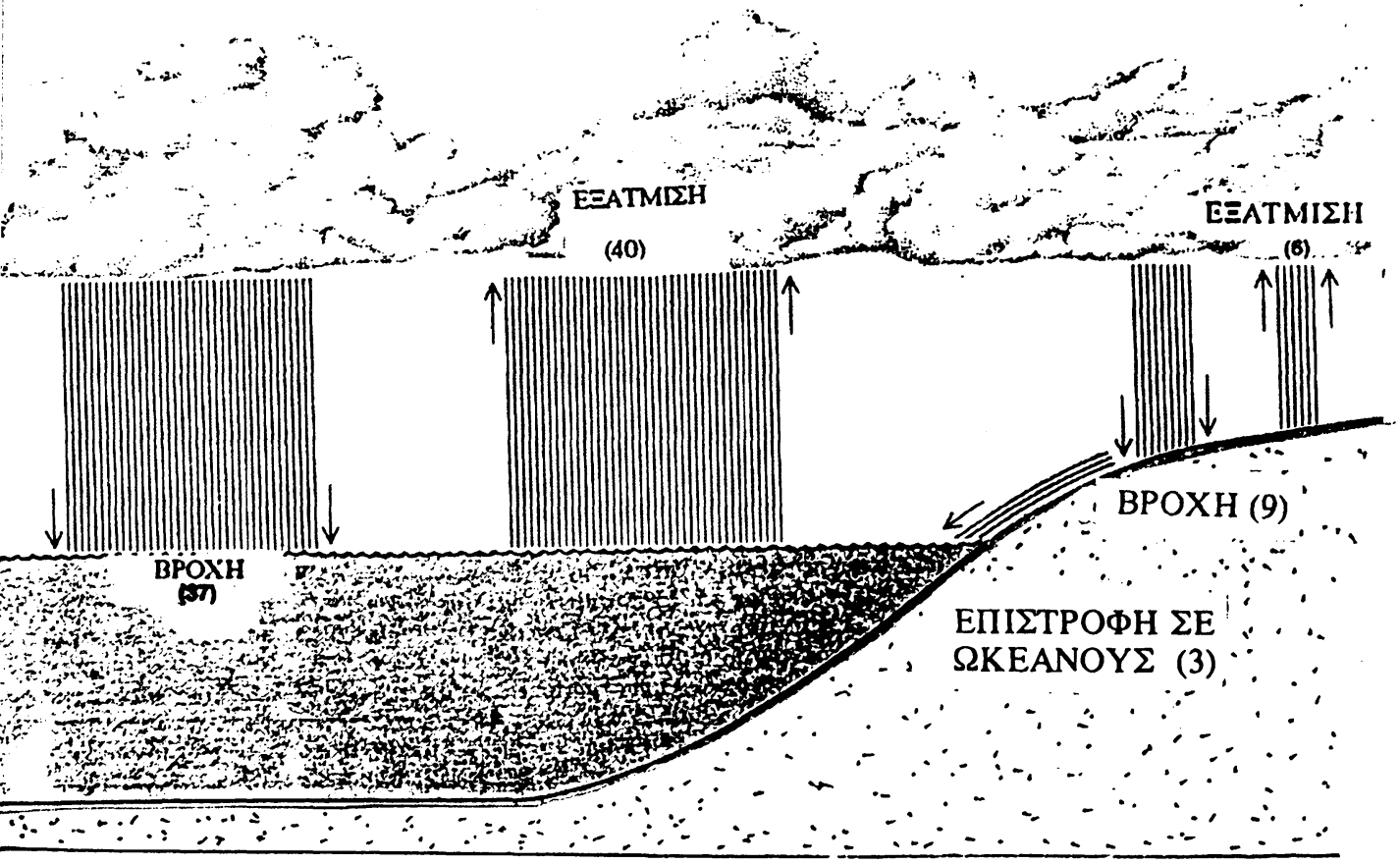


Δείχνεται το στοιχείο που κυριαρχεί σε διάφορα ύψη στην ατμόσφαιρα σύμφωνα με τις μετρήσεις των δορυφόρων

Σχήμα 36

έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει τεράστιος κίνδυνος να δημιουργηθούν από την καταστροφή του στοιχείου αυτού οι λεγόμενες "τρύπες του όζοντος", περιοχές δηλαδή στις οποίες η ποσότητα του όζοντος έχει πέσει σημαντικά, και έτσι οι υπεριώδεις ακτίνες φτάνουν χωρίς απορρόφηση στην επιφάνεια. Το Ne υπάρχει στην ατμόσφαιρα μάλλον από τα πρώτα χρόνια σχηματισμού της Γης, ενώ το He προέρχεται από ραδιενεργές διασπάσεις. Τα δυο αυτά στοιχεία μαζί με το Ar υπάγονται στα ευγενή αέρια, και επομένως από τη στιγμή που σχηματίστηκαν παραμένουν αδρανή. Υπάρχουν επίσης και ίχνη άλλων αερίων, όπως αμμωνίας, οξειδίων του αζώτου και του θείου, ιωδίου κ.λ.π., τα οποία προέρχονται κυρίως από τις βιομηχανικές καύσεις, είναι δηλαδή κάτι σαν σκουπίδια της ατμόσφαιρας.

Η ατμόσφαιρα, όπως έχουμε 'πεί και αλλού, είναι μια από τις μεγάλες δεξαμενές νερού. Οι άλλες δυο είναι η ωκεάνεια δεξαμενή και η πολική. Σήμερα, και παρά τις κάποιες διαταραχές μικρής ή μεγάλης διάρκειας υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ της ωκεάνειας και της ατμοσφαιρικής δεξαμενής, όπως δίνεται από τους παρακάτω αριθμούς, ενώ η δεξαμενή των πάγων παραμένει σταθερή. Σε ετήσια βάση 400.000 km^3 νερού εξατμίζονται από τους ωκεανούς και 60.000 km^3 από τις ηπείρους για να καταλήξουν στην ατμόσφαιρα. Από αυτά τα 370.000 km^3 θα επιστρέψουν υπό μορφή βροχής στους ωκεανούς και τα 90.000 km^3 στις ηπείρους. Άρα οι ήπειροι κερδίζουν λίγο παραπάνω νερό, σε σχέση με αυτό που δίνουν μέσα από την εξάτμιση. Το παραπανήσιο όμως αυτό ποσό των 30.000 km^3 θα επιστρεψει και πάλι στους ωκεανούς είτε με τα ποτάμια είτε με τα υπόγεια ύδατα. Μερικές ποσότητες νερού έρχονται επίσης στην επιφάνεια της Γης από τα ηφαίστεια.



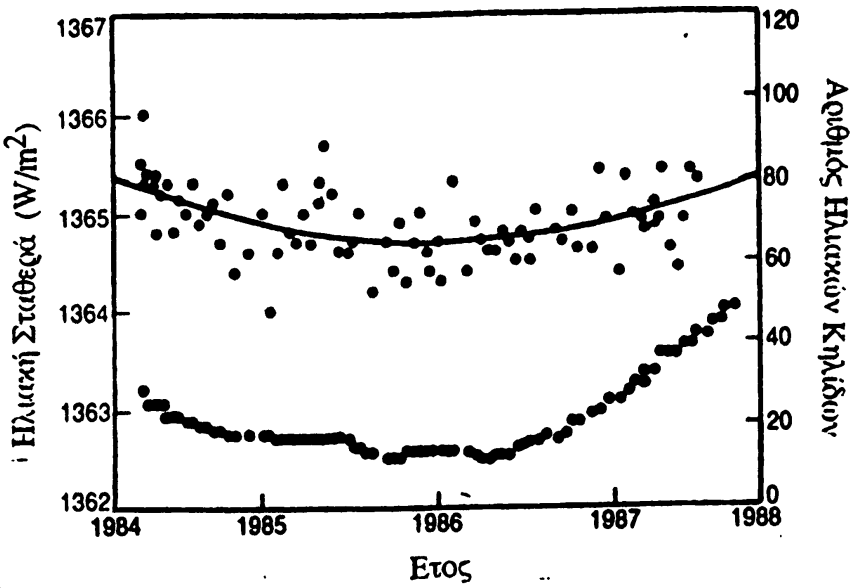
Ο ποσοτικός κύκλος του νερού σε ετήσια βάση. Οι αριθμοί στην παρένθεση είναι πολλαπλάσια της μονάδας 10.000 κυβικά χιλιόμετρα.

Σχήμα 37

3.2 Το ενεργειακό ισοζύγιο

Στις κλιματολογικές συνθήκες της Γης, εκτός από τη σύσταση της ατμόσφαιρας, ένα άλλο στοιχείο που παίζει σημαντικό ρόλο είναι η λεγόμενη ηλιακή σταθερά (Η.Σ.) S_0. Η Η.Σ. μας καθορίζει το ακριβές ποσό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στον πλανήτη μας, και η τιμή της στα εξώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας και όταν η Γη απέχει από τον Ηλιο τη μέση τιμή της μεταξύ τους απόστασης είναι

$$S_0 = 1365 \quad \text{έως} \quad 1372 \ W/m^2$$



Το επάνω διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της ηλιακής σταθεράς επί τέσσερα χρόνια (1984 έως 1988) όπως μετρήθηκε από δορυφόρους. Η συνεχής καμπύλη παριστά μιά προσπάθεια προσέγγισης της μεταβολής αυτής με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Το κάτω διάγραμμα δείχνει την μεταβολή των ηλιακών κηλίδων για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Σχήμα 38

Οι κλιματολογικές συνθήκες της Γης είναι πολύ ευαίσθητες σε μικρές μεταβολές της Η.Σ. Συγκεκριμένα, έχει υπολογιστεί ότι μια αύξησή της κατά 1% αυξάνει την ολική ενέργεια που πέφτει τελικά πάνω στη Γη κατά 2.4 W/m^2. Αυτό εκτιμάται ότι θα αυξήσει τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη μας κατά 1.6 με 2.6 ^oC, μετά την πάροδο αρκετών χρόνων.

Σήμερα ξέρουμε ότι η Η.Σ. δεν παραμένει σταθερή, αλλά υφίσταται κάποιες μικρές ή μεγάλες μεταβολές. Άλλες απ' αυτές οφείλονται σε φαινόμενα που συμβαίνουν στον Ηλιο, και άλλες οφείλονται στη μεταβολή των αστρονομικών ποσοτήτων που χαρακτηρίζουν τη γήινη τροχιά γύρω από τον Ηλιο. Εδώ θα ασχοληθούμε λίγο με τις πρώτες.

Ένα ηλιακό φαινόμενο που επηρεάζει την Η.Σ. είναι αυτό των ηλιακών κηλίδων. Οι ηλιακές κηλίδες είναι μικρές περιοχές πάνω στην επιφάνεια του Ηλιου, οι οποίες εκπέμποιν λιγότερη ενέργεια απ' ότι η υπόλοιπη επιφάνεια. Έτσι, αν συγκριθούν με την υπόλοιπη έντονα λαμπρή επιφάνεια φαίνονται σαν μαύρα στίγματα. Ο αριθμός των κηλίδων έχει ένα κύκλο μεταβολής ανάμεσα σε ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο. Κατά τη διάρκεια του ελάχιστου, ενδέχεται να μην υπάρχουν καθόλου κηλίδες στον ηλιακό δίσκο, ενώ κατά το μέγιστο ο αριθμός τους καλύπτει το 1 με 2% του δίσκου. Αν, λοιπόν, πάρουμε την ακραία θέση ότι οι κηλίδες δεν εκπέμπουν καθόλου ενέργεια, μπορούν στο μέγιστο να μεταβάλουν την ενέργεια που εκπέμπει ο Ηλιος κατά 10 με 20 W/m^2, προς τα κάτω. Στην πραγματικότητα, όμως, και οι κηλίδες εκπέμπουν ενέργεια, και μάλιστα η θερμοκρασία τους είναι μόνο 10% με 20% μικρότερη απ' ότι του υπόλοιπου ηλιακού δίσκου. Αυτό σημαίνει ότι τελικά η μέγιστη μεταβολή της ενέργειας που ακτινοβολεί ο Ηλιος λόγω των κηλίδων είναι μόνο 0.1 με 0.2%. Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ενέργεια που ακτινοβολεί ο Ηλιος προέρχεται από την εμφάνιση πολύ λαμπρών περιοχών, οι οποίες ονομάζονται πυρσοί, και οι οποίες περιβάλουν τις ηλιακές κηλίδες. Οι πυρσοί καλύπτουν μια μεγαλύτερη περιοχή απ' ότι οι κηλίδες, και δρούν αντίθετα απ' ότι αυτές. Αυξάνουν δηλαδή την εκπομπή ηλιακής ενέργειας. Έτσι, μετά την ανάπτυξη των κηλίδων

αυξάνονται και οι πυρσοί όπως και η συνεισφορά τους στην ηλιακή ενέργεια. Όταν, στη συνέχεια οι ηλιακές κηλίδες μειώνονται και φτάνουν σ' ένα ελάχιστο, μειώνονται και οι πυρσοί όπως και η συνεισφορά τους στην ηλιακή ενέργεια. Από πειράματα που έγιναν με τη βοήθεια δορυφόρων βρέθηκε ότι καθώς οι κηλίδες πήγαιναν προς το ελάχιστο η ηλιακή σταθερά μειωνόταν κατά 0.02%, ενώ μετά το ελάχιστο υπήρχε μια αύξησή της κατά το ίδιο ακριβώς ποσοστό.

Τέλος, μεταβολή της Η.Σ. και συγκεκριμένα αύξησή της, αναμένεται να υπάρξει από τη συνεχώς αυξανόμενη, όπως είδαμε, ενέργεια που εκλύουν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στον Ήλιο. Αυτό, όμως, δεν πρέπει να μας ανησυχεί προς το παρόν, μιας και θα συμβεί μετά από πάροδο πολλών εκατομμυρίων χρόνων.

Ας έλθουμε τώρα να δούμε κάποια στοιχεία γύρω από το ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας και του πλανήτη μας. Η ολική ενέργεια που πέφτει πάνω σε μια σφαίρα ακτίνας R η οποία καλύπτει όλη την ατμόσφαιρα είναι ίση με $\pi R^2 S_0$, όπου πR^2 είναι το εμβαδόν που προβάλλει η σφαίρα κάθετα στην πορεία των ηλιακών ακτίνων. Όμως ένα μεγάλο ποσοστό αυτής της ενέργειας ξαναανακλάται στο διάστημα τόσο από την ατμόσφαιρα όσο και από τη Γη. Εάν a είναι ο συντελεστής ανάκλασης, τότε τελικά η προσπίπτουσα ενέργεια $E_{προσ.}$ που μένει στον πλανήτη μας είναι

$$E_{προσ.} = \pi R^2 (1- a) S_0 \quad (1)$$

και η ανακλώμενη ενέργεια $E_{αν.}$ ίση με

$$E_{αν.} = \pi R^2 a S_0 \quad (2)$$

Από διάφορες μετρήσεις έχουμε ότι a = 0.30 ± 0.03, δηλαδή περίπου το 1/3 της ακτινοβολίας ανακλάται και πάλι πίσω στο διάστημα. Ο συντελεστής a ονομάζεται albedo. Έτσι παίρνουμε ότι ανά μονάδα επιφάνειας

$$\varepsilon_{προσ.} = \frac{E_{προσ.}}{4\pi R^2} = 0.7239.4 \ W/m^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{αν.} = \frac{E_{αν.}}{4\pi R^2} = 102.6 \ W/m^2 \quad (4)$$

$$s_o = \frac{S_o}{4\pi R^2} = 342 \ W/m^2$$

Όμως η Γη ακτινοβολεί στο διάστημα, όπως όλα τα σώματα που έχουν δική τους θερμότητα. Αν και η γήινη επιφάνεια πλησιάζει ως προς την ακτινοβολία της προς αυτό που η θεροδυναμική ονομάζει "ακτινοβολία μέλανος σώματος", αυτό ισχύει πολύ χροντρικά για την ακτινοβολία της ατμόσφαιρας. Έτσι, μόνο σε μια πολύ πρόχειρη προσέγγιση μπορούμε πράγματι να θεωρήσουμε ότι ο πλανήτης μας σαν ένα ενιαίο σύνολο ακτινοβολεί σαν μέλαν σώμα. Εάν κάνουμε, όμως, μια τέτοια προσέγγιση, τότε οι νόμοι της θερμοδυναμικής (νόμος Stefan-Boltzmann) μας λέει ότι η ενέργεια που ακτινιβολείται $E_{\alpha\kappa\tau.}$ συνολικά από τον πλανήτη μας στο διάστημα είναι

$$E_{\alpha\kappa\tau.} = 4\pi R^2 \sigma T_e^4 \qquad (5)$$

όπου $4\pi R^2$ το εμβαδόν της επιφάνειας που ακτινοβολεί, σ ένας συντελεστής (συντελεστής Stefan-Boltzmann) και T_e η ενεργή θερμοκρασία ακτινοβολίας σε ^oK, δηλαδή η θερμοκρασία που θα είχε η Γη αν ήταν πλήρως μέλαν σώμα. Είναι προφανές από τα παραπάνω ότι η ενέργεια E_o' που παραμένει τελικά στον πλανήτη μαις θα είναι η διαφορά των (1) και (5), δηλαδή

$$E'_o = \pi R^2(1- a) S_o - 4 \pi R^2 \sigma T_e^4 \qquad (6)$$

ή ανάγοντας την E'_o στη μονάδα της επιφάνειας

$$E_o = \frac{E'_o}{4\pi R^2} = \frac{(1- a)}{4} S_o - \sigma T_e^4 \qquad (7)$$

Εάν ο πλανήτης μαις βρίσκεται σε μια ισορροπία και ούτε αυξάνει ούτε μειώνει τη μέση θερμοκρασία του, τότε

$$E_o = 0 \quad ή \quad T_e = \left\{ \frac{(1- a)}{4 \sigma} S_o \right\}^{1/4} \qquad (8)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των διαφόρων μεγεθών στην παραπάνω σχέση παίρνουμε

$$T_e = 255\ ^oK \quad ή \quad T_\varepsilon = -18\ ^oC \tag{9}$$

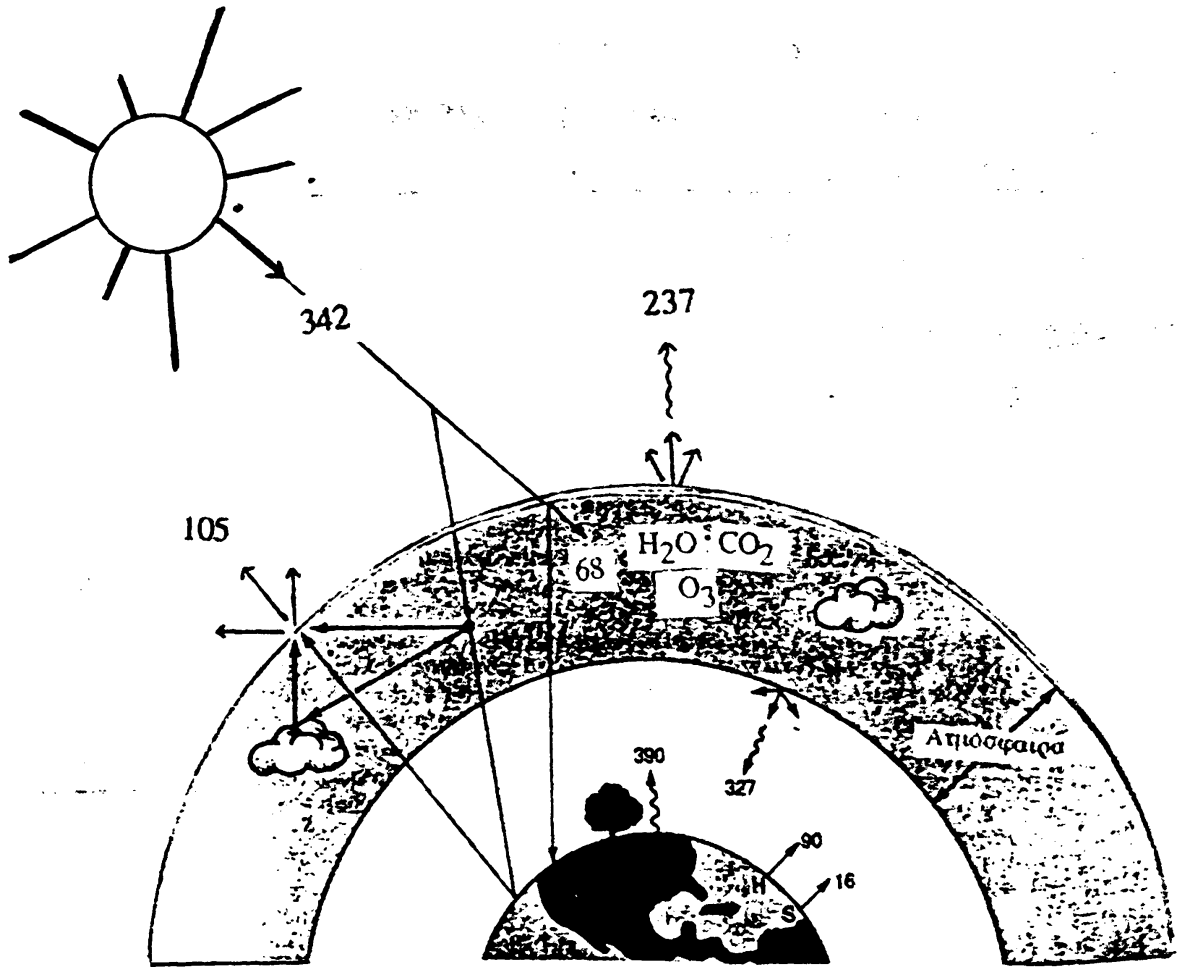
Αυτή είναι η μέση θερμοκρασία σε ύψος 5 km στη γήινη ατμόσφαιρα. Θέτοντας την τιμή αυτή της T_e στην (5) παίρνουμε τότε

$$\frac{E_{\alpha\kappa\tau.}}{4\ \pi\ R^2} = 237\ W/m^2$$

Αντίθετα, η μέση επιφανειακή θερμοκρασία $\bar{T}_{\varepsilon\pi.}$ είναι 15 ^oC. Πού οφείλεται αυτή η διαφορά ανάμεσα στην $\bar{T}_{\varepsilon\pi.}$ και στην $\bar{T}_e$; Προφανώς σε μια διαδικασία που εγκλωβίζει ένα ποσό ενέργειας στην ατμόσφαιρα και το επιστρέφει στη γήινη επιφάνεια, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της τελευταίας. Και βέβαια η διαδικασία αυτή είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το φαινόμενο αυτό αυξάνει, σε μια πρώτη προσέγγιση, τη μέση επιφανειακή θερμοκρασία κατά 33 ^oC. Η συνολική ενέργεια που εγκλωβίζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου ανά μονάδα της επιφάνειας βρίσκεται με τη βοήθεια του πίνακα I ότι είναι

$$E_{\theta\varepsilon\rho\mu.} = 153\ W/m^2$$

Τα παραπάνω, λοιπόν, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ατμόσφαιρα χάνει σταθερά 106 W/m^2 και επομένως κρυώνει, ένα ποσό βέβαια που το κερδίζει συνεχώς η Γη. Όμως, τα πράγματα δεν σταματούν εδώ. Γιατί αφενός μεν η ατμόσφαιρα είναι ένα ρευστό που επιτρέπει να κυκλοφορούν αέριες μάζες από μια περιοχή σε μια άλλη όταν υπάρχει διαφορετική θερμοκρασία σε δυο διαφορετικές περιοχές της, αφετέρου δε η γήινη επιφάνεια μπορεί να χάνει θερμότητα με τρόπους που δεν περιλαμβάνονται στο το φαινόμενο της ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα από την εξάτμιση του νερού που βρίσκεται σ' αυτήν. Η τελευταία θερμότητα θα αποδοθεί στην ατμόσφαιρα όταν οι υδρατμοί θα υγροποιηθούν. Οι νέες αυτές διεργασίες μπαίνουν επομένως και αυτές στο ενεργειακό ισοζύγιο της γήινης επιφάνειας και της ατμόσφαιρας, και σταματούν τη



Το μέσο ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη μας. Το Η συμβολίζει τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (κύταξε παρακάτω) και το S τη θερμότητα που χάνεται από τη Γη λόγω τυρβώδους ροής του αέρα στην επιφάνειά της.

Σχήμα 39

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Το ενεργειακό ισοζύγιο σ' ολόκληρο τον πλανήτη μας, στην ατμόσφαιρα και στη γήινη επιφάνεια καθορίζεται από τους παρακάτω αριθμούς.

1. Σ' ολόκληρο τον πλανήτη

i)	Δέχεται από τον Ηλιο	+ 342	W/m^2
ii)	Ανακλώνται πίσω στο διάστημα	- 105	W/m^2
iii)	Ακτινοβολούνται στο διάστημα, ως ακτινοβολία μέλανος σώματος θερμοκρασίας $T_e = -18\ ^oC$	- 237	W/m^2
	Τελικό αποτέλεσμα	0	

2. Στην ατμόσφαιρα

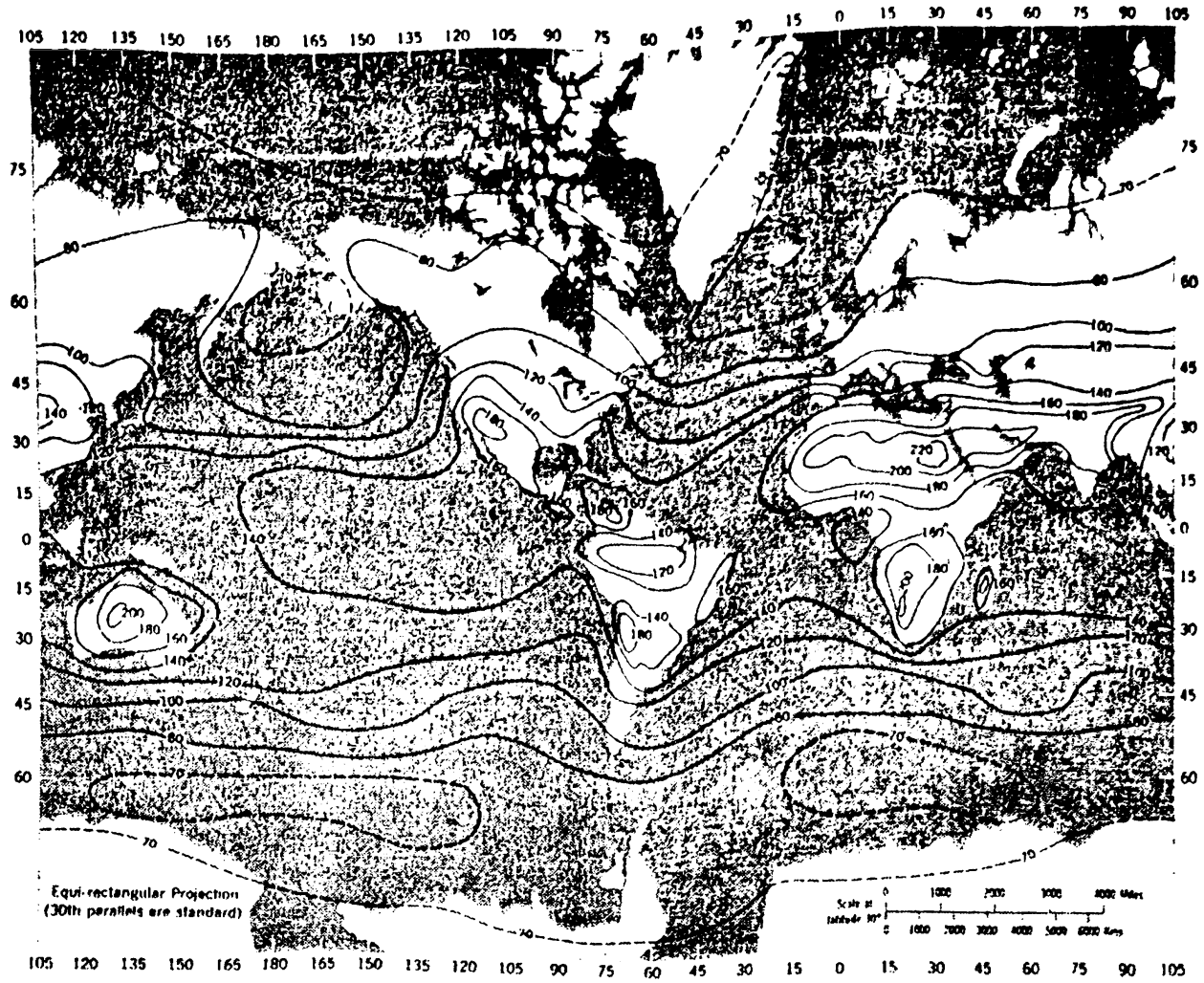
i)	Κρατά από ηλιακή ακτινοβολία	+ 68	W/m^2
ii)	Δέχεται από ακτινοβολία της γήινης επιφάνειας	+ 390	W/m^2
iii)	Δέχεται από υγροποίηση υδρατμών	+ 90	W/m^2
iv)	Δέχεται από ροή αέριων μαζών	+ 16	W/m^2
v)	Ακτινοβολεί στο διάστημα σαν μέλαν σώμα θερμοκρασίας -18 ^oC	- 237	W/m^2
vi)	Ακτινοβολεί προς τη Γη	- 327	W/m^2
	Τελικό αποτέλεσμα	0	

3. Στη γήινη επιφάνεια

i)	Κρατά από ηλιακή ακτινοβολία	+ 169	W/m^2
ii)	Ακτινοβολεί προς την ατμόσφαιρα	- 390	W/m^2
iii)	Δέχεται από την ακτινοβολία της ατμόσφαιρας	+ 327	W/m^2
iv)	Χάνει από εξάτμιση νερού	- 90	W/m^2
v)	Χάνει από ροή αέριων μαζών	- 16	W/m^2
	Τελικό αποτέλεσμα	0	

συνεχή θέρμανση της πρώτης και το συνεχές πάγωμα της δεύτερης. Μ' άλλα λόγια τα 106 W/m^2 που κερδίζει η γήινη επιφάνεια από την ατμόσφαιρα τα χάνει μέσα από το φαινόμενο της εξάτμισης και της ροής θερμών αέριων μαζών προς τα πάνω. Από την άλλη μεριά τα 106 W/m^2 που χάνει η ατμόσφαιρα τα ξαναπαίρνει από την υγροποίηση των υδρατμών στα σύννεφα, και από ζεστές αέριες μάζες που ανέρχονται. Τελικά, λοιπόν, φτάνουμε σε μια ενεργειακή ισορροπία, στην οποία όλα τα μέρη του πλανήτη μας βρίσκονται σε μια σταθερή κατά μέσο όρο κατάσταση.

Βέβαια, η εικόνα που παρουσιάσαμε παραπάνω είναι αρκετά απλοποιημένη. Έτσι, αν θα λάβει κανένας υπόψη του την κατανομή της ενέργειας που στέλνει ο Ηλιος στη Γη, αλλά και τις ιδιαιτερότητες του κάθε τόπου στην ακτινοβολία που ανακλά, διαπιστώνει ότι η $\bar{T}_{\epsilon\pi.}$ δεν είναι η ίδια σε όλα τα μέρη της Γης, ούτε και η $\bar{T}_e$ η ίδια σε όλες τις περιοχές της ατμόσφαιρας που απέχουν 5 km από την επιφάνεια. Άλλες περιοχές της Γης δέχονται περισσότερη ηλιακή ενέργεια (όσες είναι κοντά στον Ισημερινό) και άλλες λιγότερη (όσες είναι κοντά στους πόλους), ενώ άλλες περιοχές αντανακλούν έντονα την ηλιακή ακτινοβολία (όπως όσες καλύπτονται από χιόνι ή έχουν λίγη βλάστηση) και άλλες λιγότερο έντονα (για παράδειγμα όσες έχουν μεγάλη βλάστηση ή τα βαθιά νερά της θάλασσας). Έτσι αναπόφευκτα εισάγονται και οριζόντιες διορθώσεις στο ενεργειακό ισοζύγιο, τόσο από μετακινήσεις αέριων μαζών όσο και από αντίστοιχες μετακινήσεις θαλασσινών νερών. Αν λοιπόν κανένας θελήσει να φύγει από τη "μέση περιγραφή" και να λάβει υπόψη του και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες του πλανήτη μας, τα πράγματα γίνονται αρκετά πολύπλοκα. Να διευκρινήσουμε δε ότι στα παραπάνω "μέση περιγραφή" σημαίνει ότι βγάζουμε το μέσο όρο για όλες τις περιοχές της γήινης επιφάνειας για όλες τις εποχές του χρόνου.

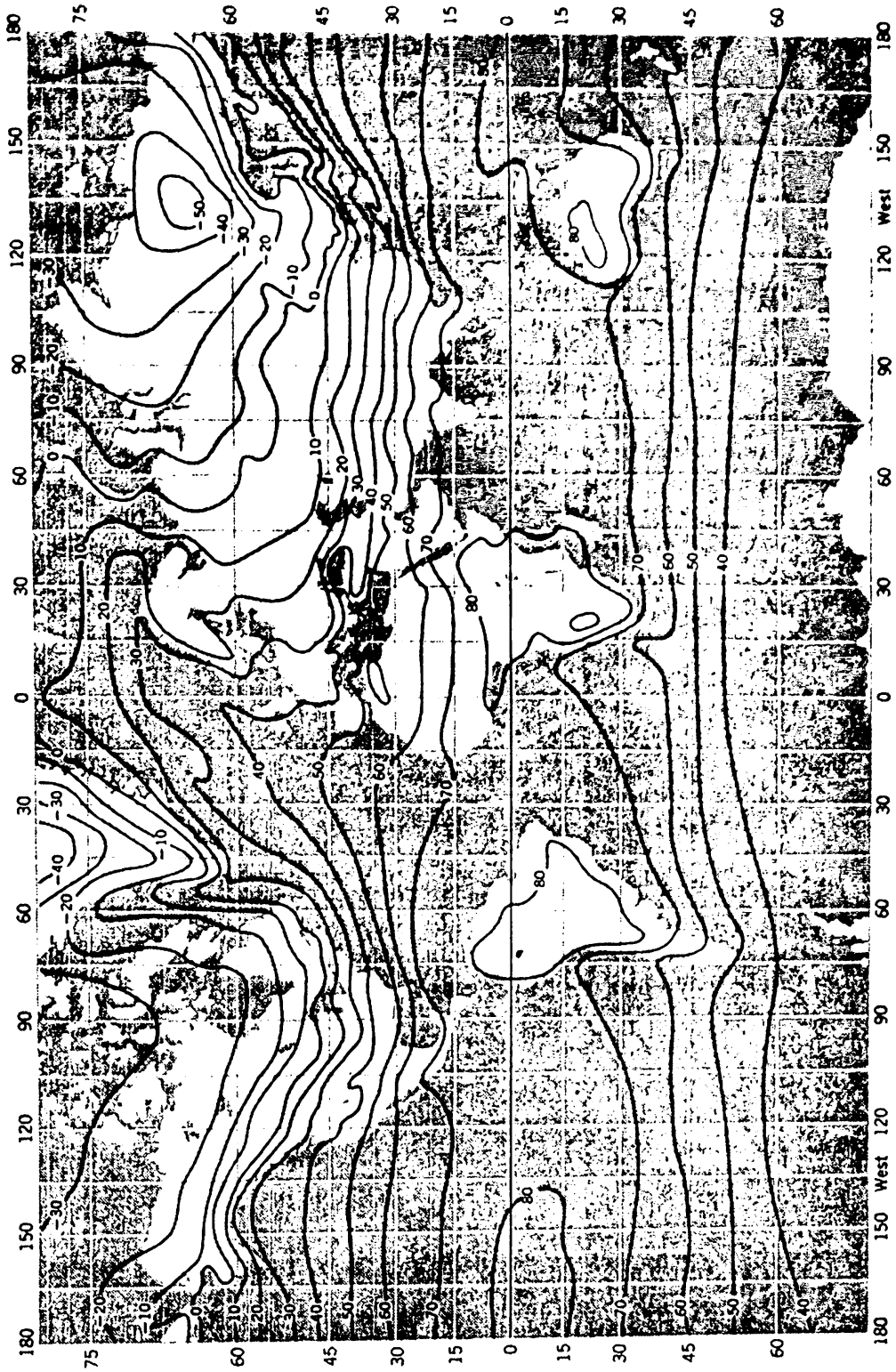


Η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του πλανήτη μας σε χιλιάδες θερμίδες ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο ανά έτος.

Σχήμα 40

Όπως βλέπουμε από τους παραπάνω αριθμούς η Γη δέχεται ένα σημαντικό ποσό ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα, κυρίως όταν η τελευταία θερμαίνεται από τον Ηλιο, αλλά και εκπέμπει προς αυτή ένα σημαντικό ποσό ακτινοβολίας (ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος). Η τελευταία ακτινοβολία μπορεί να μειώσει σημαντικά τη θερμοκρασία της γήινης επιφάνειας κατά τη νύχτα, και έτσι να δημιουργήσει μεγάλες ημερήσιες διαφορές θερμοκρασίας, ανάλογα κυρίως με τη βλάστηση που υπάρχει εκεί.

Η μεγαλύτερη ημερήσια μεταβολή της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπει η Γη στο διάστημα παρατηρείται πάνω από ερημικές εκτάσεις, όπως η Sahara, η Kalahari, η έρημος της Σαουδικής Αραβίας κ.λ.π. Η μεταβολή αυτή σε ενεργειακό επίπεδο φτάνει τα 60 W/m^2. Φαίνεται, έτσι, αμέσως ότι η ημερήσια μεταβολή σχετίζεται άμεσα με τις εδαφικές συνθήκες. Οσο πιο ξηρό είναι το χώμα και όσο πιο αραιή η βλάστηση, τόσο πιο πολύ η ηλιακή ακτινοβολία το ζεσταίνει. Στην αντίθετη περίπτωση, ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας αυτής καταναλώνεται στην εξάτμιση του νερού που έχει το χώμα και τα φυτά. Αυτό μειώνει και την ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας, μιας και μειώνει την έντονη θερμοκρασία της ημέρας, και την εκπομπή της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις όπου τα παραπάνω διαφοροποιούνται από λίγο έως πολύ, αν στην περιοχή που εξετάζουμε έχουμε ανάπτυξη σύννεφων. Η μικρότερη ημερήσια μεταβολή παρουσιάζεται στις επιφάνειες των ωκεανών, οι οποίες εμφανίζουν πολύ μικρές θερμοκρασιακές διαφορές και επομένως και μικρές μεταβολές στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Οι διαφορές αυτές μας δίνουν στο ενεργειακό επίπεδο μια μεταβολή το πολύ 10 W/m^2.



ι συνεχείς καμπύλες είναι ισόθερμες που δείχνουν τη μέση ερμοκρασία στο επίπεδο της θάλασσας σε ^{o}F για το μήνα ανουάριο.

Σχήμα 41

3.3 Ο κατακόρυφος χωρισμός της ατμόσφαιρας

Το ύψος της γήινης ατμόσφαιρας δεν μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια, και πρόσφατα τεχνητοί δορυφόροι ανίχνευσαν ίχνη αέρα μέχρι και ύψος 1000 χιλιομέτρων. Όπως είναι βέβαια προφανές από τις σχέσεις της υδροστατικής, η ατμοσφαιρική πίεση πέφτει με το ύψος, και σε τόσο μεγάλα ύψη όσο το προηγούμενο μηδενίζεται. Στην κορυφή του Έβερεστ η πίεση έχει πέσει στο μισό της τιμής της στην επιφάνεια, ενώ σε ύψος 20 km έχει πέσει στο 1/5 της τιμής της. Σε ύψος 50 km η πίεση έχει γίνει πια αμελητέα, αφού έχει πέσει στο 1/1000 της αρχικής τιμής.

Η ατμόσφαιρα χωρίζεται κατά την κατακόρυφο σε διαφορετικές ζώνες, ανάλογα με τα φαινόμενα που παρατηρούνται σ' αυτές, τη θερμοκρασία τους, κ.λ.π. Η πρώτη ζώνη ονομάζεται τροπόσφαιρα, και εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης μέχρι ύψος περίπου 8 km πάνω από τις πολικές περιοχές και 16 - 19 km πάνω από την περιοχή του Ισημερινού. Είναι η ζώνη στην οποία παρατηρούνται τα μετεωρολογικά φαινόμενα, μιας και εδώ είναι συγκεντρωμένη η συντριπτική πλειοψηφία των υδρατμών. Στα πρώτα 10 km της τροπόσφαιρας η θερμοκρασία πέφτει με το ύψος, με ένα ρυθμό 0.5 έως 0.6 ^{o}C ανά 100 m. Από τα 10 km όμως έως και τα 14 km η θερμοκρασία παραμένει αμετάβλητη σχεδόν στους - 20 ^{o}C. Το τμήμα της ατμόσφαιρας που εφάπτεται με τη γήινη επιφάνεια και εκτείνεται από την επιφάνεια μέχρι ύψος 1 km ονομάζεται "ζώνη επαφής" ή "ζώνη επιφάνειας". Είναι στην ουσία το τμήμα της ατμόσφαιρας που τρίβεται με τη γήινη επιφάνεια και βρίσκεται σε άμεση αλληλεπίδραση μ' αυτή. Μέσω αυτού η ατμόσφαιρα τροφοδοτείται με υδρατμούς από εξάτμιση και επίσης μέσω αυτού παίρνει το μεγαλύτερο ποσό της θερμότητά της. Και, δυστυχώς, και πάλι μέσω αυτού τροφοδοτείται με όλα τα "βιομηχανικά σκουπίδια" που τη μολύνουν και την καταστρέφουν. Τέλος, είναι ο αέρας αυτού του τμήματος που αναπνέουμε και μας επηρεάζει άμεσα. Η τριβή ανάμεσα στη ζώνη επιφάνειας και τη Γη είναι τόσο

μεγάλη, ώστε σχεδόν η μισή κινητική ενέργεια που έχει η ατμόσφαιρα στο σύνολό της λόγω της συνεχούς κίνησής της, χάνεται στο τμήμα αυτό.

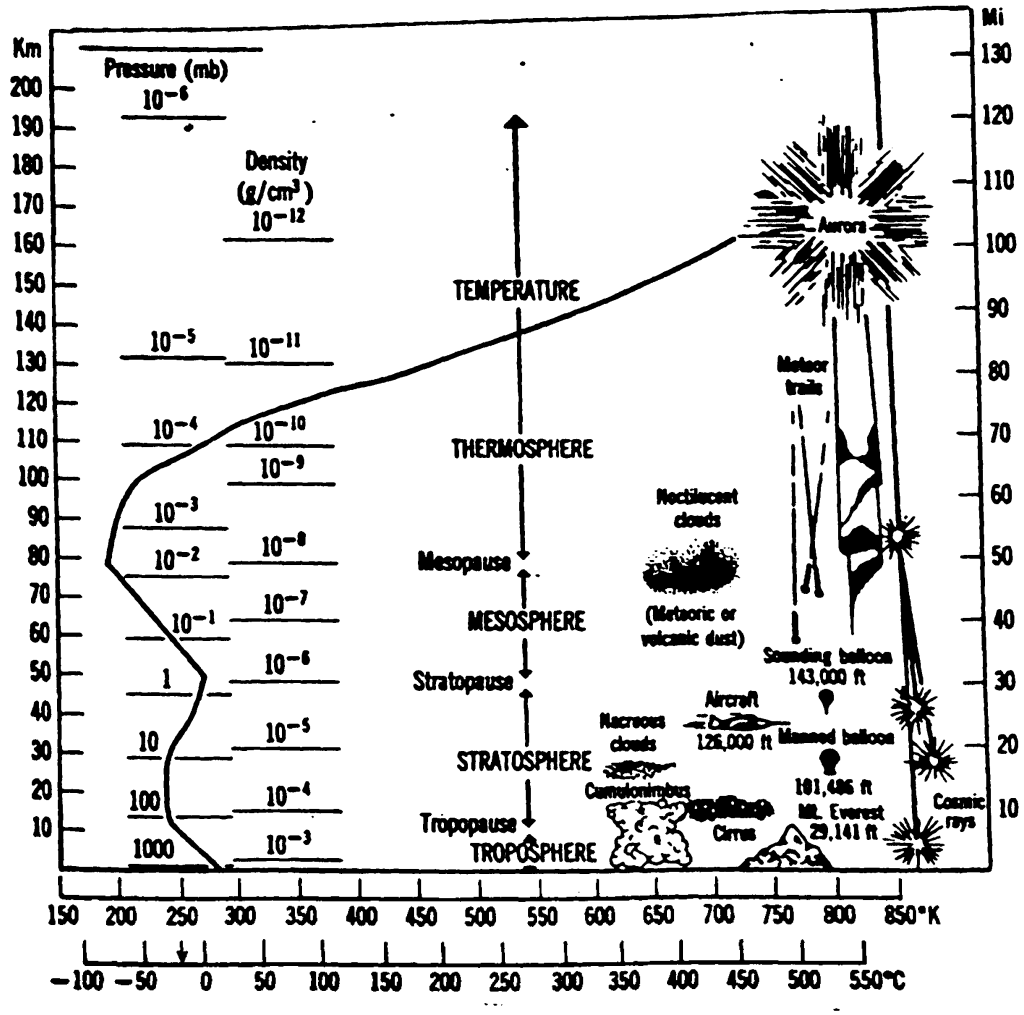
Μετά την τροπόσφαιρα υπάρχει η τροπόπαυση, μια ονομασία που έχει λίγο διαφορετικές μεταξύ τους σημασίες, ανάλογα με την οπτική γωνιά που την βλέπει ο καθένας. Είναι μάλλον μια στενή περιοχή που οριοθετεί το πάνω όριο της κατακόρυφης ανάμιξης και μετακίνησης αερίων μαζών. Αν και είναι, πάντως, καθορισμένη με κάποια σχετική ακρίβεια στις τροπικές περιοχές, τα όριά της είναι αρκετά συγκεχυμένα στους πόλους.

Ακολουθεί η ζώνη της στρατόσφαιρας, η οποία εκτείνεται από την τροπόπαυση έως και την στρατόπαυση, σε ύψος περίπου 50 km. Το κατώτερο τμήμα της, μέχρι και ύψος 20 km περίπου, έχει μια σταθερή θερμοκρασία, την ίδια που έχει και το ανώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας. Από το ύψος όμως αυτό και πάνω αρχίζει μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία φτάνει στην στρατόπαυση σε ένα μέγιστο κοντά στους 0 ^{o}C. Η στρατόπαυση σηματοδοτεί το οριακό στρώμα ανάμεσα στην στρατόσφαιρα και την επόμενη ζώνη, τη μεσόφαιρα. Η μεσόσφαιρα εκτείνεται από ύψος λίγο πιο πάνω από τα 50 km έως και τα 75 km περίπου. Στη ζώνη αυτή η θερμοκρασία αρχίζει και πάλι να πέφτει με το ύψος έως όταν φτάσει σε ένα ελάχιστο ίσο με -70 ^{o}C περίπου. Αυτή είναι και η πιο μικρή θερμοκρασία που παρατηρείται σ' ολόκληρη την ατμόσφαιρα. Η μεσόφαιρα χωρίζεται από την επόμενη ζώνη, τη θερμόσφαιρα, από μια μεταβατική ζώνη που ονομάζεται μεσόπαυση.

Από τα 80 km έως και τα τελευταία ίχνη ατμόσφαιρας, εκτείνεται η τελευταία ζώνη της ατμόσφαιρας, η θερμόσφαιρα. Το όνομά της το οφείλει στο ότι σ' αυτή παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, που σε ύψος 150 km μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 500 ^{o}C, ενώ σε ακόμη υψηλότερα στρώματα ο αέρας αποκτά θερμοκρασία μέχρι και 1500 ^{o}C. Να υπενθυμίσουμε ότι στη θερμοδυναμική N μόρια ενός αερίου έχουν θερμοκρασία T η οποία ορίζεται από τη σχέση

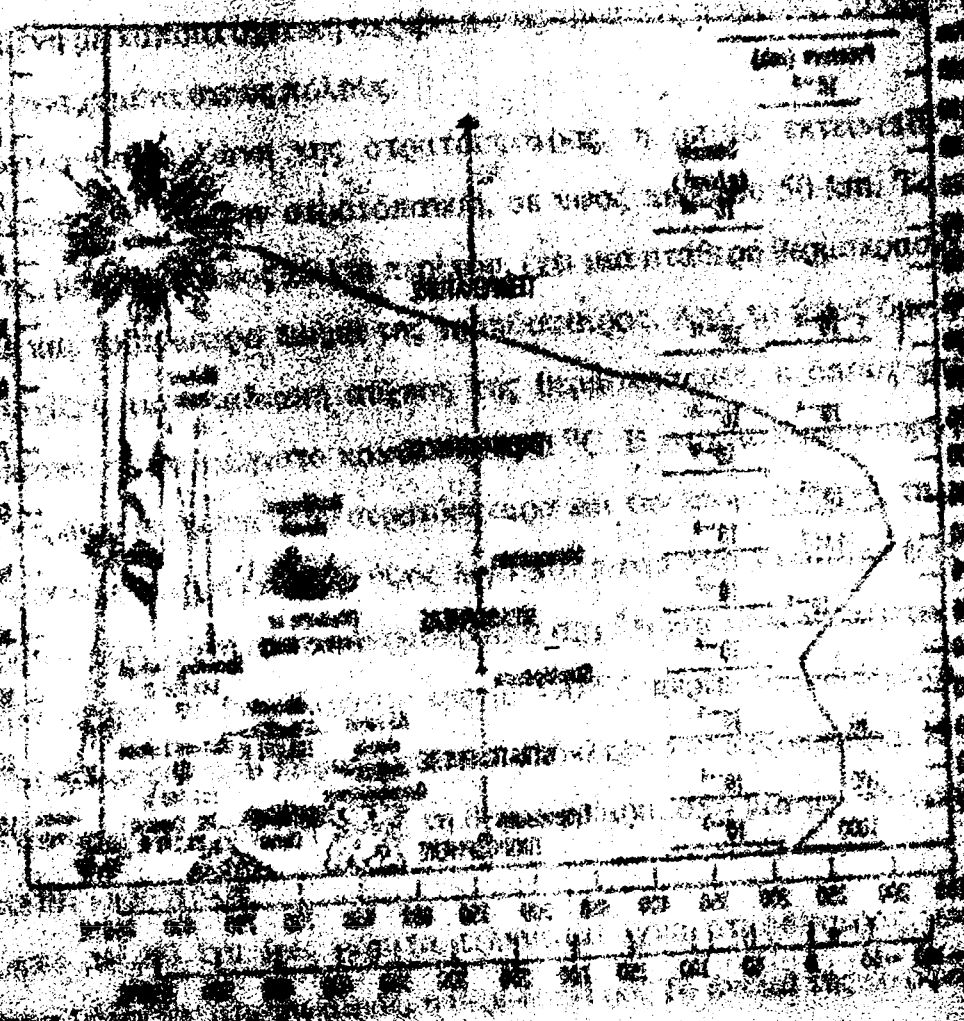
$$\bar{E} = \frac{3}{2} N k T$$

όπου $\bar{E}$ η μέση κινητική ενέργεια των μορίων και k μια σταθερή ποσότητα, η σταθερά του Boltzmann. Οι υψηλές θερμοκρασίες της θερμόσφαιρας, λοιπόν, απλά σημαίνουν ότι εκεί τα μόρια του αέρα έχουν πολύ μεγάλη μέση κινητική ενέργεια.



Η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια μιά ημέρας με ηλιοφάνεια.

Σχήμα 42



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

4.1 Πως δημιουργούνται οι σεισμοί

Οι καταστροφικές συνέπειες των σεισμών νομίζουμε ότι είναι γνωστές σε όλους, είτε τις έχουν υποστεί είτε όχι. Στις μέρες μας, το 1988, ένας μόνο σεισμός που έγινε στη βιομηχανική πόλη Tangshan της Κίνας σκότωσε 500.000 ανθρώπους. Άλλοι σεισμοί στη Χιλή, στο San Francisco, στο Κάιρο, στο Ιράν κ.λ.π. έχουν σπείρει τον πανικό στους ανθρώπους και έχουν δημιουργήσει τεράστιες οικονομικές καταστροφές. Ο σεισμός μάλιστα της Χιλής στις 22 Μαΐου του 1960 ήταν τόσο ισχυρός ώστε έθεσε ολόκληρη τη Γη σε ταλάντωση, κάνοντάς την να πάλλεται σα μια καμπάνα. Οι εικόνες που μεταδίδουν τα μέσα μαζικής ενημέρωσης, μετά από κάθε καινούριο χτύπημα είναι πέρα για πέρα αποκαλυπτικές για το τι αφήνει πίσω του το πέρασμα του εγκέλαδου. Μόνο στον 20^{ο} αιώνα έχουν γίνει σ' όλο τον κόσμο 55 καταστροφικότατοι σεισμοί με μέγεθος ανάμεσα στους 8 και 8.7 βαθμούς της κλίμακας Richter, ενώ κάθε χρόνο σ'

ολόκληρο τον πλανήτη μας γίνονται μερικές χιλιάδες αισθητοί από τον άνθρωπο σεισμοί. Πέρα δε από τις άμεσες συνέπειες των σεισμών είτε σε ανθρώπινα θύματα είτε σε υλικές ζημιές, δεν θα πρέπει να παραγνωρίσουμε και την άσχημη ψυχολογική κατάσταση των ανθρώπων που ζουν σε σεισμογενείς περιοχές, σε περιοχές δηλαδή που χτυπιούνται από καιρό σε καιρό από τη μανία του εγκέλαδου.

Αν προσπαθούσε κανένας να ορίσει τι είναι ο σεισμός, τότε θα λέγαμε ότι: 'Ως σεισμό ορίζουμε τις εδαφικές κινήσεις της Γης που έχουν μικρή περίοδο και οι οποίες παράγονται από φυσικά αίτια που βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης". Οι κινήσεις αυτές του εδάφους σε ένα σεισμό μπορεί να είναι είτε κατακόρυφες, είτε οριζόντιες είτε κυματοειδείς. Αυτό εξαρτιέται κυρίως από την απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού. Οι σεισμικές δονήσεις παραπέρα διαρκούν από μερικά δευτερόλεπτα ή το πολύ ένα λεπτό, αν και για λόγους ψυχολογικούς μετά από ένα έντονο τράνταγμα του εδάφους οι άνθρωποι έχουν την αίσθηση ότι το έδαφος σειέται συνεχώς.

Όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα, οι σεισμοί οφείλονται στις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών. Ειδικότερα, οι σεισμοί δημιουργούνται από την αντίσταση που συναντούν κατά την κίνησή τους δυο λιθοσφαιρικές πλάκες στην περιοχή που συναντιώνται, όπως και το τμήμα της λιθοσφαιρικής πλάκας που βυθίζεται. Γενικά στο τμήμα αυτό δρουν πολλές δυνάμεις κατά την κίνησή του από την τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα σ' αυτό και τα πετρώματα του μανδύα που το περιβάλλουν, τη θερμική κυκλοφορία κ.λ.π. οι οποίες δημιουργούν πάνω του τάσεις, ροπές, στρέψεις κ.λ.π. Το ίδιο στις περιοχές όπου δυο λιθοσφαιρικές πλάκες έχουν συνιστώσα σύγκλισης η μια εμποδίζει την κίνηση της ύλης και ασκούνται τεράστιες δυνάμεις τριβής. Βέβαια, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι όσο μεγάλες κι αν είναι οι δυνάμεις αυτές, είναι κατά πολύ μικρότερες από τις ανώσεις που δέχονται οι πλάκες και τις κινητήριες δυνάμεις από τα θερμικά ρεύματα του μανδύα. Έτσι, τελικά η κίνησή τους δεν μπορεί ποτέ να σταματήσει. Οπωσδήποτε, όμως, δεν είναι εύκολη, μιας και απαιτεί εντυπωσιακά μεγάλες

δυνάμεις για να διατηρηθεί. Οι δυνάμεις αυτές προέρχονται όπως είπαμε από τα θερμικά ρεύματα του μανδύα, τα οποία κινούν μιά λιθοσφαιρική πλάκα σαν ένα ενιαίο σύνολο, και άρα και το κατερχόμενο τμήμα της. Να υπενθυμίσουμε ότι οι ταχύτητες των λιθοσφαιρικών πλακών ανάρχονται σε μερικά cm ανά έτος. Ειδικότερα τώρα για το τμήμα που κατέρχεται, η κάθοδος αρχικά υποβοηθιέται και από το γεγονός ότι η θερμοκρασία του είναι πιο χαμηλή από τα υλικά του μανδύα. Έτσι, το τμήμα αυτό συμμετέχει πια στη θερμική κυκλοφορία των υλικών του μανδύα, στην οποία τα ψυχρότερα υλικά κατέρχονται και τα θερμότερα ανέρχονται. Σε συγκεκριμένα βάθη πάντως και το τμήμα αυτό συναντά μεγάλη αντίσταση. Το βάθος δε μέχρι το οποίο μπορεί να φτάσει τελικά είναι περίπου 650 με 700 km.

Αν υποθέσουμε ότι το κατερχόμενο τμήμα μιας λιθοσφαιρικής πλάκας έχει μέση κατακόρυφη ταχύτητα 5cm/sec, τότε η απόσταση των 700 km διανύεται σε ένα διάστημα 14 εκατομμυρίων χρόνων. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ο χρόνος αυτός λιγοστεύει προφανώς. Γενικά, κατά μέσο όρο έχει υπολογιστεί ότι ένα τμήμα μιας λιθοσφαιρικής πλάκας που τώρα βρίσκεται στην περιοχή σύγκλισης, θα φτάσει στο βάθος των 700 km μετά από 10 εκατομμύρια χρόνια κατά μέσο όρο.

Αν και προηγούμενα αναφέραμε ότι οι σεισμοί παρατηρούνται στα όρια σύγκλισης δυο λιθοσφαιρικών πλακών, να σημειώσουμε ότι έχουν υπάρξει πάντως και περιπτώσεις σεισμών μακριά από τα παραπάνω όρια σε περιοχές όπου ο στερεός φλοιός θεωρείται ότι είναι σταθερός. Αρχικά η ύπαρξη των σεισμών αυτών ήταν ένα αίνιγμα. Αργότερα όμως διαπιστώθηκε ότι περιχές στις οποίες υπήρχε παλιότερα τεκτονική δράση, ήταν δυνατόν να κρατήσουν αποτεμιευμένη για πολλά χρόνια ελαστική ενέργεια σε πετρώματα. Η απελευθέρωση της ενέργειας αυτής είναι η αιτία της ύπαρξης σεισμών μακριά από τα όρια σύγκλισης δυο πλακών. Πιο χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιου σεισμού αυτός του Newcastle της Αυστραλίας το 1989.

Όπως είπαμε και στα προηγούμενα, όταν η σύγκλιση αφορά μιαν ωκεάνεια και μιαν ηπειρωτική πλάκα, τότε η πλάκα που βυθίζεται είναι συνήθως η

ωκεάνεια. Από τα δυο είδη δυνάμεων που δρουν πάνω στις λιθοσφαιρικές πλάκες, προωθητικές δυνάμεις και αντιστάσεις, οι πρώτες είναι μεγαλύτερες, όπως είπαμε, και επομένως οι κινήσεις των πλακών δεν σταματούν ποτέ. Με τη μόνη και σημαντική διαφορά ότι οι κινήσεις αυτές δεν είναι συνεχείς. Ας δούμε γιατί συμβαίνει αυτό. Θα περιοριστούμε κατ' αρχάς στην περιοχή που οι δυο λιθοσφαιρικές πλάκες συγκλίνουν. Τα πετρώματα που υπάρχουν στο εσωτερικό της Γης, ακόμη και αυτά, όπως για παράδειγμα ο γρανίτης, που στις καθημερινές συνθήκες της ζωής μας μας φαίνονται πολύ σκληρά και ασυμπίεστα, στις συνθήκες που επικρατούν εκεί και κυρίως κάτω από τις εντυπωσιακά μεγάλες δυνάμεις που δρουν πάνω τους, μπορούν να παραμορφωθούν. Άρα, έχουν ελαστικότητα και μπορούν να αποταμιεύσουν μηχανική ενέργεια, με τον ίδιο τρόπο που αυτό γίνεται σ' ένα συνηθισμένο ελατήριο. Και ακριβώς αυτό συμβαίνει στα πετρώματα που υπάρχουν στην περιοχή σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών. Καθώς οι προωθητικές δυνάμεις σπρώχνουν τις πλάκες τη μια εναντίον της άλλης, η έντονη τριβή που αναπτύσσεται οδηγεί σε μια ελαστική παραμόρφωση τα πετρώματα. Άρα, η κινητική ενέργεια των πλακών αποταμιεύεται ως ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης των πετρωμάτων.

Η παραμόρφωση όμως αυτή, και επομένως και η αποταμίευση της μηχανικής ενέργειας, δεν μπορεί να συνεχιστεί επ' άπειρον. Έτσι, όταν ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο, το οποίο εξαρτιέται από τις συνθήκες στις οποίες βρίσκονται τα πετρώματα αλλά και από το είδος των πετρωμάτων, έχουμε μια απότομη έκλυση σχεδόν όλης της αποταμιευμένης μηχανικής ενέργειας αφενός μεν σε θερμότητα, αφετέρου δε σε κινητική ενέργεια δονήσεων, δηλαδή σε σεισμικά κύματα. Η στιγμή λοιπόν της απότομης έκλυσης της μηχανικής ενέργειας παραμόρφωσης με ένα απότομο και ισχυρό τράνταγμα, είναι η στιγμή της γέννησης ενός σεισμού.

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι μεγάλη αποταμίευση ελαστικής ενέργειας, και άρα και σεισμούς, θα έχουμε στις περιοχές όπου τα πετρώματα είναι αρκετά κρύα και συμπαγή. Στην αντίθετη περίπτωση τα πετρώματα είναι ευήλατα, η τριβή είναι μικρή, και επομένως μικρή θα είναι και η ενέργεια που θα

αποταμιευτεί τελικά. Από την κατάσταση των πετρωμάτων εξαρτιέται επίσης και η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων που παράγονται. Τα κύματα αυτά έχουν περιόδους οι οποίες κυμαίνονται από 10^{-1} sec έως άπειρο. Τα κύματα με τη μεγαλύτερη περιοδο δημιουργούν σχεδόν μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους γύρω από το επίκεντρο. Αντίθετα τα κύματα με τη μικρότερη περίοδο πέφτουν μέσα στο ακουστό φάσμα και δεν προκαλούν μεγάλες ζημιές. Να σημειώσουμε δε ότι σαν ένα ενιαίο σώμα η Γη ολόκληρη έχει ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης που αντιστοιχεί σε περίοδο μιας ώρας περίπου.

Η περιοχή από την οποία έχουμε την απότομη έκλυση της μηχανικής ενέργειας ονομάζεται εστία του σεισμού, η δε απόστασή της από την επιφάνεια ονομάζεται εστιακό βάθος. Παραπέρα, το σημείο στο οποίο η ευθεία που ενώνει το κέντρο της Γης με την εστία τέμνει την επιφάνεια της Γης, ονομάζεται επίκεντρο του σεισμού. Αυτά τα τρία στοιχεία, τα οποία βέβαια δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, μαζί με το πόσο μεγάλος είναι ο σεισμός, είναι αυτά που προσπαθούν να βρουν σε πρώτη φάση οι σεισμολόγοι, όταν τα όργανά τους καταγράφουν ένα σεισμό. Τέλος, είναι προφανές ότι στην περιοχή του εστιακού χώρου του σεισμού θα έχουμε μια διάρρηξη του στρώματος των πετρωμάτων με μετακίνηση των περιοχών που διαχωρίζονται. Τη διάρρηξη αυτή την ονομάζουμε ρήγμα. Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία, τους σεισμολόγους ενδιαφέρει μέγιστα και η γεωμετρία του ρήγματος (προσανατολισμός, διαστάσεις κ.λ.π.).

Θα πρέπει πάντως να σημειώσουμε ότι η έκλυση της ελαστικής ενέργειας που έχει αποταμιευτεί στα πετρώματα δε γίνεται ποτέ μόνο με μια απότομη και μοναδική μετακίνηση των πετρωμάτων. Συνήθως υπάρχει μια προετοιμασία της μεγάλης και απότομης μετακίνησης, η οποία και δημιουργεί τον κύριο σεισμό, από μικρές πρόδρομες δονήσεις. Τις δονήσεις αυτές τις ονομάζουμε προσεισμούς. Το ίδιο, μετά τον κύριο σεισμό, παραμένουν ακόμη στα πετρώματα του ρήγματος αποθέματα αποταμιευμένης ελαστικής ενέργειας. Τα αποθέματα αυτά εκλύονται μετά τον κύριο σεισμό σιγά-σιγά, και οι δονήσεις που προκαλούν ονομάζονται μετασεισμοί.

Η ολική ενέργεια που εκλύεται από τη διάρρηξη ενός ρήγματος για έναν αισθητό σεισμό είναι ανάμεσα στα 10^{20} με 10^{25} erg. Για να αντιληφθεί κανένας το μέγεθος της ενέργειας αυτής να αναφέρουμε ότι είναι το ποσό που θα έπαιρνε κανένας από την έκρηξη 10 τόνων TNT. Αν δε όλη αυτή η ενέργεια δινόταν σε ένα σχεδόν σφαιρικό σώμα με διάμετρο όσο το ύψος του Έβερεστ (8.8 km), θα το εκσφενδόνιζε προς τα πάνω με μια ταχύτητα 28 m/sec.

Μετά τη συνολική απελευθέρωση της μηχανικής ενέργειας που υπήρχε αποταμιευμένη στα πετρώματα, τα πετρώματα αυτά πηγαίνουν σε μια κατάσταση ισορροπίας. Αυτό γίνεται σε διάστημα κλάσματος του sec (για ένα μικρό σεισμό) έως μερικών λεπτών (για έναν πολύ μεγάλο σεισμό). Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις στις οποίες τα πετρώματα οδεύουν προς την κατάσταση ισορροπίας σε διάστημα αρκετών λεπτών, ή ημερών ή ακόμη και ετών. Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε απότομη και βίαιη έκλυση της σεισμικής ενέργειας, και επομένως δεν έχουμε ούτε δόνηση του εδάφους ούτε καταστροφές. Η αργή αυτή έκλυση της μηχανικής ενέργειας ονομάζεται ασεισμική ολίσθηση. Ο ακριβής πάντως λόγος που η έκλυση γίνεται άλλοτε απότομα και άλλοτε με αργό ρυθμό δεν είναι γνωστός. Αν όμως μας είναι γνωστή η ταχύτητα μιας λιθοσφαιρικής πλάκας, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τι ποσοστό της κινητικής ενέργειας πάει σε σεισμική ενέργεια και τι σε ασεισμική ολίσθηση. Σε μερικές περιοχές, όπως για παράδειγμα στη Χιλή, όλη η κινητική ενέργεια των λιθοσφαιρικών πλακών μετατρέπεται τελικά σε σεισμική ενέργεια, ενώ σε άλλες περιοχές, όπως στο τόξο Marianas, στο δυτικό Ειρηνικό, όλη η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ασεισμική ολίσθηση.

Οι σεισμοί που δημιουργούνται στις περιοχές σύγκλισης δυο λιθοσφαιρικών πλακών είναι ρηχοί, δηλαδή έχουν εστιακό βάθος μικρότερο από 50 km. Αυτοί είναι και οι πιο καταστροφικοί σεισμοί. Υπάρχουν, όμως, και σεισμοί με μεγάλα εστιακά βάθη, οι οποίοι καμιά φορά είναι εξίσου καταστροφικοί με τους πρώτους. Μια τέτοια εξαίρεση αποτέλεσε ο σεισμός του Βουκουρεστίου στις 4 Μάρτη του 1977, ο οποίος είχε βάθος περίπου 150 km και μέγεθος 7.2 βαθμούς της κλίμακας Richter. Από τους μεγαλύτερους δε σεισμούς με μεγάλο εστιακό βάθος ήταν και

αυτός της Κολομβίας το 1970, που ήταν 7.6 βαθμών της κλίμακας Richter, και η εστία του ήταν 650 km κάτω από την επιφάνεια της Γης. Οι καταγραφές αυτές, μας δείχνουν ότι εκτός από τις περιοχές όπου συναντώνται δυο λιθοσφαιρικές πλάκες που συγκλίνουν, σεισμούς παράγει και το βυθιζόμενο τμήμα της λιθοσφαιρικής πλάκας. Άλλη αιτία που να παράγει σεισμούς μέχρι τόσο μεγάλα βάθη δεν υπάρχει. Η ακριβής πάντως διεργασία που γεννά σεισμούς σε τόσο μεγάλα βάθη φαίνεται να μην είναι η ίδια με αυτή που γεννά τους σχετικά ρηχούς, αν και η όλη κατάσταση είναι αρκετά αβέβαιη.

Κατ' αρχήν, ενώ έχουν καταγραφεί σεισμοί σε όλα τα βάθη μέχρι 680 με 690 km, κάτω από το βάθος αυτό δεν έχει καταγραφεί κανένας σεισμός. Έχουμε δηλαδή μιαν απότομη παύση στο βάθος αυτό. Δυο πράγματα μπορεί να συμβαίνουν σ' αυτή την περίπτωση. Είτε το κατερχόμενο τμήμα δεν μπορεί να πάει παρακάτω γιατί συναντά μιαν εντυπωσιακά μεγάλη αντίσταση στην κίνησή του, είτε πράγματι πηγαίνει πιο βαθιά, αλλά στις νέες συνθήκες που συναντά (βρίσκεται πια μέσα στον εσωτερικό μανδύα) τα υλικά του υφίστανται τέτοιους μετασχηματισμούς φάσης που δεν αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής ανάμεσα σ' αυτά και στα υλικά του μανδύα. Στην πρώτη περίπτωση, η κάθε περιοχή του μανδύα (εσωτερικός και εξωτερικός μανδύας) έχει τη δική της κυκλοφορία η οποία δεν μπλέκεται με την κυκλοφορία της άλλης περιοχής. Στη δεύτερη όμως περίπτωση ολόκληρος ο μανδύας ίσως έχει μιαν ενιαία κυκλοφορία. Δυστυχώς, τα όσα υπάρχουν σήμερα δεν μπορούν να αποκλείσουν με πειστικό τρόπο μια από τις δυο εκδοχές.

Υπέρ της πρώτης άποψης είναι το γεγονός ότι στο βάθος των 700 km έχουμε ένα απότομο σταμάτημα των σεισμών. Αν η κυκλοφορία όλου του μανδύα ήταν ενιαία θα περιμέναμε να υπάρχει μαι σταδιακή θέρμανση της πλάκας που βυθίζεται και άρα και μια σταδιακή μείωση της τριβής και περαπέρα μια σταδιακή μείωση των σεισμών. Μερικοί, όμως, υποστηρίζουν ότι το κατερχόμενο τμήμα της πλάκας εισχωρεί πράγματι μέσα στον εσωτερικό μανδύα, η μη σεισμικότητά του δε οφείλεται στη διαφορετική χημική σύσταση και τις συνθήκες του τελευταίου.

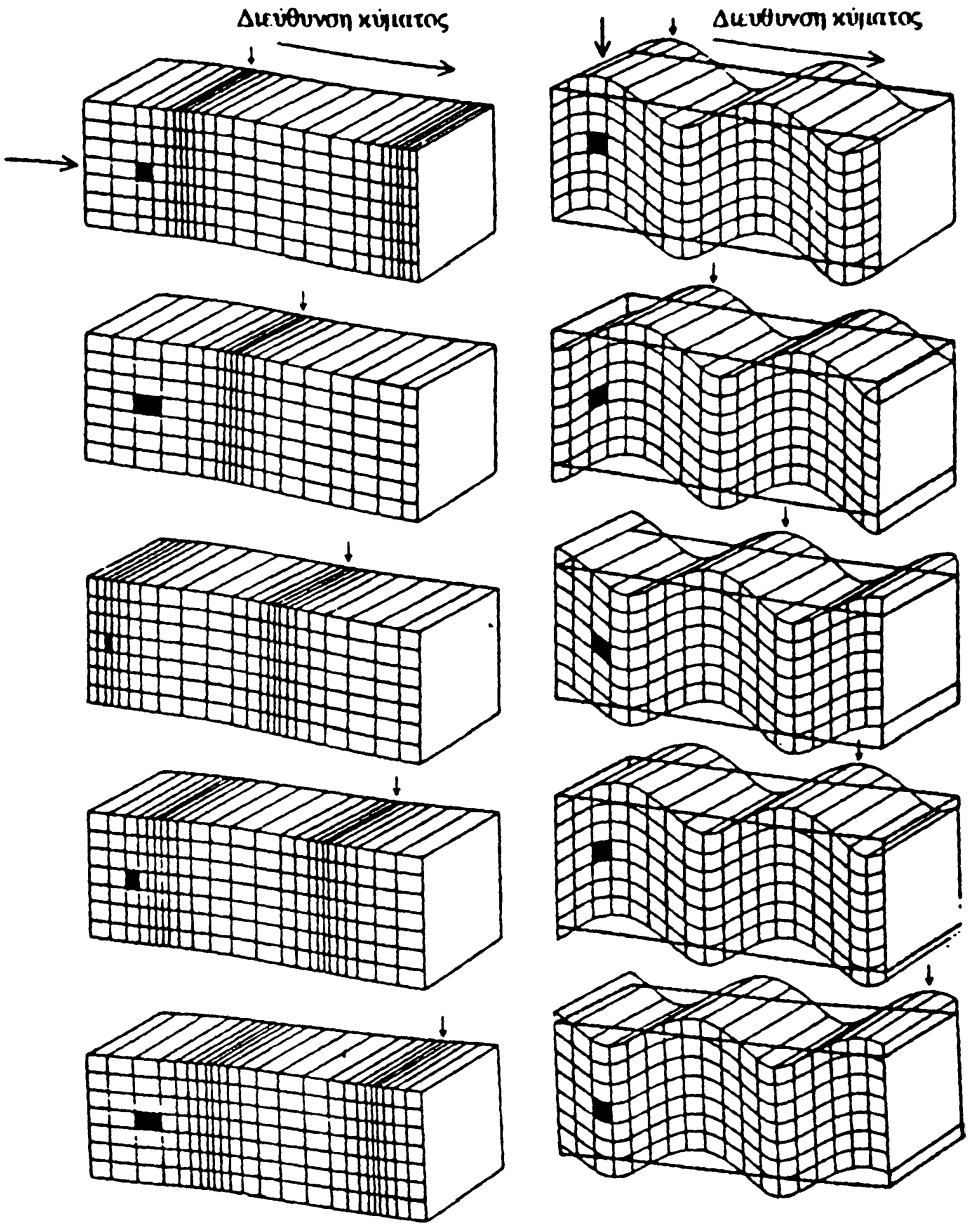
Ως προς τα ακριβή αίτια τώρα που παράγουν τους σεισμούς μεγάλου βάθους έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα. Σύμφωνα με ένα από αυτά η τριβή του κατερχόμενου τμήματος της πλάκας με τα υλικά του μανδύα παράγει θερμότητα με πιο γρήγορο ρυθμό απ' αυτόν που αυτή απάγεται στις γύρω περιοχές. Έχουμε έτσι μια τοπική συσσώρευση θερμότητας, που κάνει τα υλικά της πλάκας πιο ευήλατα, μερικά δε τα τήκει κιόλας. Αυτό διευκολύνει ακόμη πιο πολύ την κάθοδο της πλάκας, μιας και στην ουσία μειώνει την τριβή, το γεγονός δε ότι η κάθοδος γίνεται πιο γρήγορη παράγει ακόμη περισσότερη θερμότητα. Έχουμε λοιπόν ένα ανατροφοδοτούμενο φαινόμενο, που έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη κίνηση της πλάκας προς τα κάτω, και επομένως τη δημιουργία ενός σεισμού.

Σύμφωνα με ένα άλλο μοντέλο οι σεισμοί μεγάλου εστιακού βάθους οφείλονται σε διάφορα υγρά, κυρίως νερό, που έχουν παγιδευτεί στο κατερχόμενο τμήμα της πλάκας από την εποχή που αυτό κουβαλούσε πάνω του κάποιον ωκεανό. Στις συνθήκες που επικρατούν σε μεγάλα βάθη η ύπαρξη του νερού μειώνει τις τάσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στα πετρώματα που τρίβονται, και αυτό διευκολύνει και πάλι το γρήγορο κι απότομο γλύστριμα της πλάκας προς τα κάτω, τη δημιουργία δηλαδή ενός σεισμού. Ο γεωμετρικός τόπος των εστιών διαφόρων σεισμών που οφείλονται στην ίδια πλάκα, μας δίνει με ανάγλυφο τρόπο την πορεία καθόδου της πλάκας αυτής. Γενικά οι σεισμοί μεγάλου εστιακού βάθους μας παρέχουν ανεκτίμητες πληροφορίες για τις φυσικές και χημικές διεργασίες που συντελούνται ανάμεσα στα υλικά του μανδύα και σ' αυτά της κατερχόμενης πλάκας. Κυρίως δε δεν αφήνουν καμιά αμφιβολία για το ότι υπάρχει πράγματι ένα κατερχόμενο τμήμα σχετικά ψυχρής λιθοσφαιρικής πλάκας σε θερμά υλικά του μανδύα.

4.2 Τα σεισμικά κύματα

Όπως είπαμε και προηγούμενα τα κύματα που παράγονται σε ένα στερεό είναι δυο ειδών, διαμήκη και εγκάρσια. Τα δυο αυτά είδη των κυμάτων παράγονται επομένως και κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Όταν δε η δόνηση φτάσει στην επιφάνεια της Γής δημιουργεί και κύματα επιφάνειας, τα οποία ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, κύματα Rayleigh και κύματα Love. Τα κύματα Reyleigh έχουν κι αυτά μια διαμήκη και μιά εγκάρσια συνιστώσα και κάτω από την επίδρασή τους τα σωμάτια των πετρωμάτων κινούνται ελλειπτικά, πάνω στο κάθετο επίπεδο ανάμεσα στο σταθμό που καταγράφει το σεισμό και στην εστία. Τα κύματα Love είναι εγκάρσια πολωμένα κύματα που ταλαντώνονται σε ένα οριζόντιο επίπεδο, παράλληλο στη γήινη επιφάνεια.

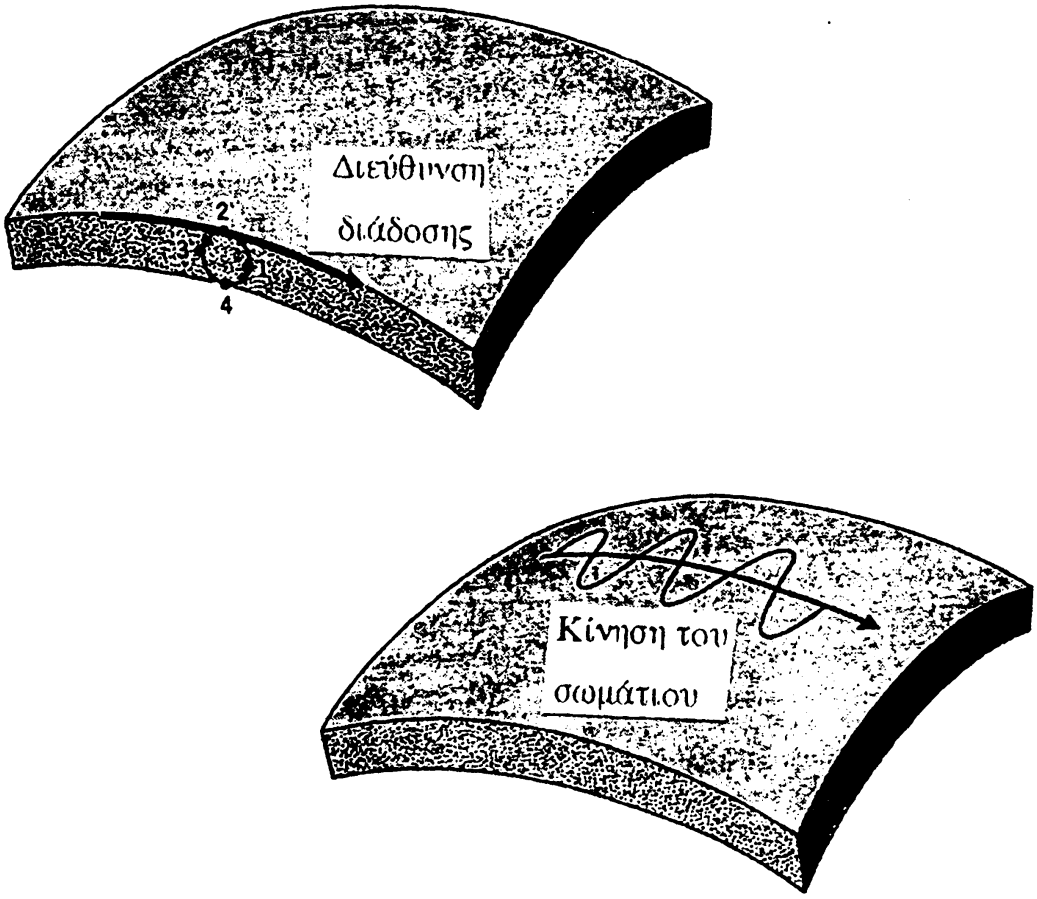
Όπως έχουμε αναφέρει, μια συγκεκριμένη κατηγορία κυμάτων έχει ταχύτητα διάδοσης η οποία εξαρτιέται από τα πετρώματα μέσω των οποίων διαδίδεται και τις συνθήκες που επικρατούν εκεί. Γενικά τα σεισμικά κύματα διαδίδονται πιο γρήγορα μέσα από πετρώματα που παραμορφώνονται δύσκολα, όπως και μέσα από κρύα υλικά, μιας και αυτά είναι πιο στερεά και ασυμπίεστα απ' ότι αντίστοιχα ζεστά υλικά. Η ταχύτητα ενός κύματος εξαρτιέται επίσης και από τον προσανατολισμό των κρυστάλλων του υλικού διάδοσης. Σε μια χοντρική προσέγγιση θα λέγαμε παραπέρα ότι η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων εξαρτιέται από τη στερεότητα του μέσου διάδοσης, ενώ η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων και της διαμήκους συνιστώσας των κυμάτων Rayleigh εξαρτιέται από τη στερεότητα και ασυμπιεστότητα του μέσου διάδοσης. Εκτός, βέβαια, από τα παραπάνω κύματα, σε έναν τόπο φτάνει μια σειρά και από άλλα κύματα, που δημιουργούνται από διαθλάσεις ή ανακλάσεις των διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων είτε στις διαχωριστικές επιφάνειες που υπάρχουν στο εσωτερικό της Γης, είτε από ανάκλαση στην ίδια την επιφάνειά της. Εάν, βέβαια, η Γη ήταν ένα ομοιογενές σφαιρικό σώμα , τότε είναι προφανές ότιτα μόνα κύματα που θα



Δείχνονται τα δυό είδη των σεισμικών κυμάτων, τα διαμήκη (αριστερά) και τα εγκάρσια (δεξιά). Δείχνεται επίσης η μεταβολή που υφίσταται μιά συγκεκριμένη επιφάνεια (μαύρο τετραγωνάκι) από την επίδραση καθενός κύματος.

Σχήμα 43

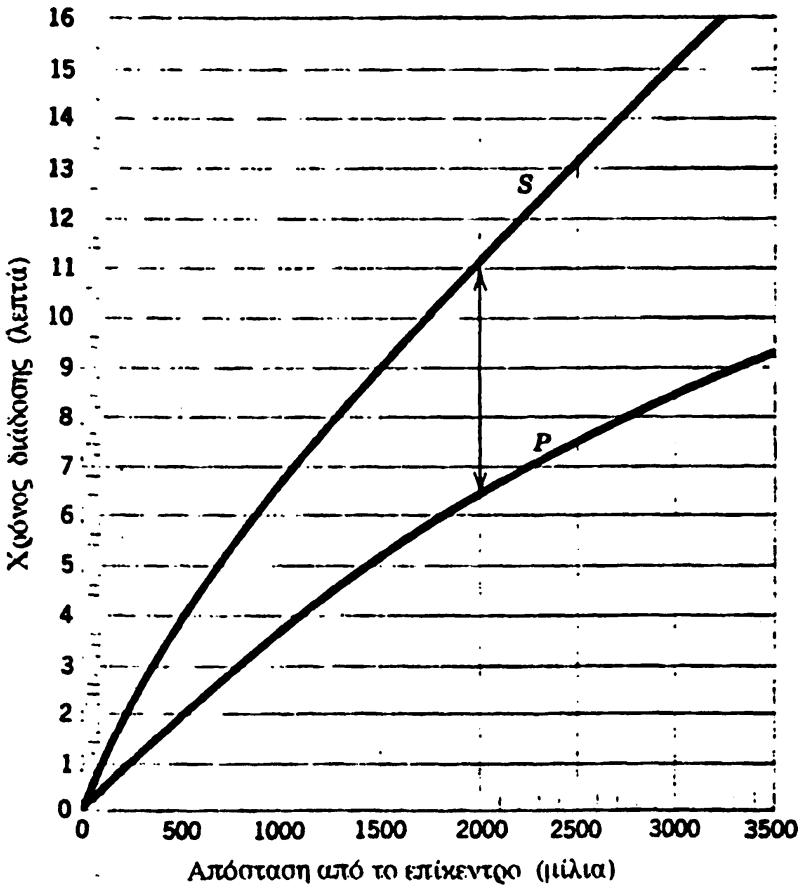
κατέγραφε ένας σεισμογράφος θα ήταν αυτά που έρχονται απευθείας από την εστία και από ανάκλαση πάνω στην επιφάνειά της. Παραπέρα δε, οι τροχιές των κυμάτων αυτών θα ήταν ευθείες γραμμές. Ξέρυμε, όμως, ότι η Γη δεν είναι ομογενής και επομένως έχουμε μια πληθώρα και άλλων κυμάτων εκτός από τα παραπάνω των οποίων οι τροχιές είναι γενικά καμπύλες. Όπως το σύνολο αυτών των κυμάτων μας βοήθησε στην εξαγωγή κάποιων σημαντικών συμπερασμάτων για το εσωτερικό της Γης, έτσι μας βοηθά και στην εύρεση όλων των σημαντικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ένα σεισμό.



Δείχνονται τα επιφανειακά κύματα Rayleigh και Love.

Σχήμα 44

Κατ' αρχήν, ας θεωρήσουμε τα εγκάρσια και διαμήκη κύματα που φτάνουν απευθείας σ' ένα τόπο, χωρίς να υποστούν ούτε ανάκλαση ούτε διάθλαση. Απ' αυτά τα διαμήκη έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης, και επομένως φτάνουν πρώτα στο σταθμό, και τα εγκάρσια ακολουθούν . Γι' αυτό και τα διαμήκη συμβολίζονται με το γράμμα P (από το αρχικό της λέξης Primae = πρώτα) ενώ τα εγκάρσια συμβολίζονται με το γράμμα S (από το αρχικό της λέξης Secundae = δεύτερα). Αυτό το συμβολισμό θα ακολουθήσουμε και εμείς από εδώ και στο εξής.



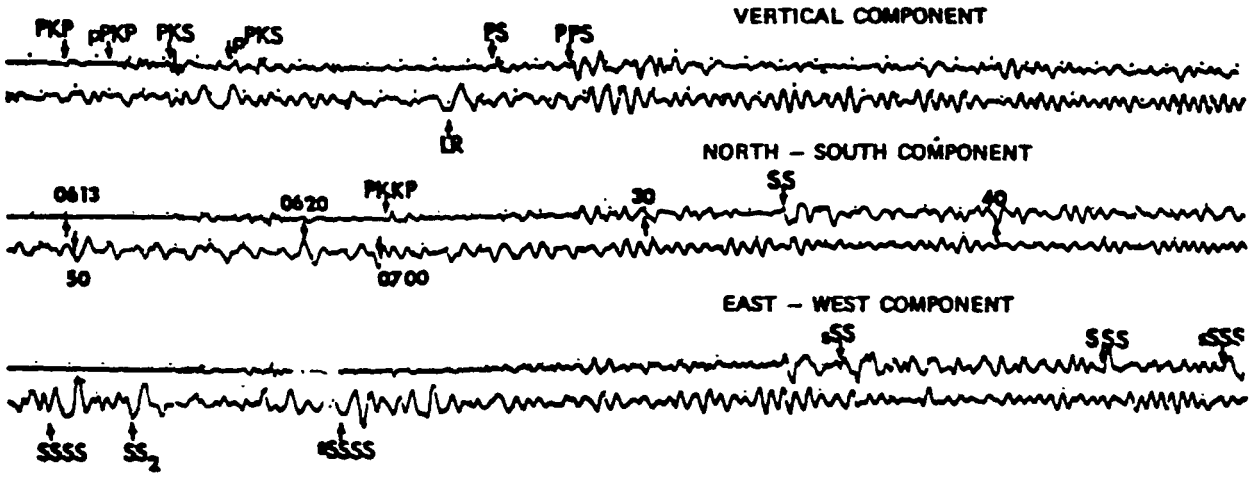
Η απόσταση που διανύουν τα P και S κύματα σα συνάρτηση του χρόνου. Οταν η διαφορά άφιξής τους σε ένα σταθμό είναι 4.63 min τότε από το σχήμα φαίνεται ότι το επίκεντρο απέχει 2000 μίλια (= 3260 km).

Σχήμα 45

Είναι λοιπόν προφανές ότι από τη διαφορά Δt στο χρόνο άφιξης των P και S κυμάτων σ' ένα τόπο, μπορούμε εύκολα να βρούμε την απόσταση L του σεισμού από τον τόπο αυτό, μέσα από τη σχέση

$$L = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\upsilon_S} - \frac{1}{\upsilon_P}}, \qquad \Delta t = t_S - t_P \qquad (1)$$

όπου υ_P και υ_S οι ταχύτητες διάδοσης των P και S κυμάτων αντίστοιχα. Η σχέση αυτή βέβαια δεν μπορεί να μας καθορίσει τη διεύθυνση προς την οποία βρίσκεται η εστία του σεισμού. Όλες όμως οι χώρες που αντιμετωπίζουν προβλήματα με τους σεισμούς έχουν εγκατεστημένο ένα ευρύ δίκτυο σεισμογράφων, οργάνων δηλαδή που καταγράφουν τους σεισμούς. Οι καταγραφές λοιπόν από τρεις τουλάχιστον σταθμούς μπορούν εύκολα, μέσα από ένα απλό πρόβλημα τριγωνισμού, να μας καθορίσουν και τη διεύθυνση του σεισμού, και παραπέρα και το εστιακό του βάθος.



Μιά τυπική καταγραφή κυμάτων που φτάνουν σε ένα σεισμογράφο

Σχήμα 46

Όπως για τα εγκάρσια και διαμήκη κύματα έχει επικρατήσει ένας συμβολισμός (S και P αντίστοιχα), οι σεισμολόγοι έχουν επιλέξει έναν ανάλογο

συμβολισμό για όλα τα σεισμικά κύματα που καταγράφει ένας σεισμογράφος. Αυτό διευκολύνει κατά πολύ τη μεταξύ τους συνενόηση. Έτσι τα διαμήκη κύματα που περνάνε μέσα από τον πυρήνα της Γης συμβολίζονται με PkP ή P', τα διαμήκη κύματα που καταγράφονται μετά από μια ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης συμβολίζονται με P'P', τα εγκάρσια κύματα που έχουν ανακλαστεί στον πυρήνα συμβολίζονται με ScS κ.λ.π. Όλα αυτά τα κύματα, μαζί με τα P και S, θα καταγραφούν από τους σεισμογράφους στους διάφορους σταθμούς.

Θα πρέπει βέβαια να γίνει προφανές ότι η εστία του σεισμού δεν είναι ένα σημείο στο εσωτερικό της Γης, αλλά μια ολόκληρη διδιάστατη περιοχή στην οποία έχουμε αποτομη παράλληλη μετατόπιση πετρωμάτων, ένα ρήγμα δηλαδή. Βέβαια, η διάρρηξη του ρήγματος σε ένα σεισμό δεν είναι ταυτόχρονη για όλη την επιφάνειά του. Ξεκινά από μια σχεδόν σημειακή περιοχή (για τα δεδομένα της γεωφυσικής), η οποία είναι η πρώτη που εκλύει απότομα την αποταμιευμένη μηχανική της ενέργεια και είναι το πιο ασθενές σημείο του ρήγματος, και στη συνέχεια διαδίδεται σε όλη την επιφάνεια του ρήγματος. Αυτό βέβαια (δηλαδή η διάδοση της διάρρηξης) απαιτεί κάποιο χρόνο και έτσι βλέπουμε ότι η αιτία που γεννά ένα σεισμό δεν είναι ούτε τοπικά αλλά ούτε και χρονικά αυστηρά περιορισμένη. Η συγκεκριμένη γεωμετρία της πηγής του σεισμού, δηλαδή ο προσανατολισμός του ρήγματος, οι διαστάσεις της περιοχής που υπήρξε παράλληλη μετακίνηση πετρωμάτων, όπως και η κατεύθυνση της μετακίνησης αυτής στο επίπεδο του ρήγματος, είναι το δεύτερο στοιχείο που αναζητούν να βρούν οι σεισμολόγοι, μετά την εξακρίβωση του επίκεντρου και του μεγέθους του σεισμού.

Θα πρέπει δε να σημειώσουμε ότι οι μεγάλοι σεισμοί διαρρηγνύουν ρήγματα εκατοντάδων χιλιομέτρων. Για παράδειγμα, στο μεγάλο σεισμό του 1906 του San Francisco (μεγέθους 8.3 της κλίμακας Richter) το ρήγμα είχε μήκος 400 km. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις στις οποίες το μήκος του ρήγματος δεν υπερβαίνει τα 20 km. Στην τελευταία αυτή περίπτωση βέβαια το ρήγμα φαίνεται, για τα γεωλογικά δεδομένα, σαν να είναι μία σημειακή πηγή. Όσο μεγαλύτερες

πάντως οι διαστάσεις του ρήγματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που εκλύεται σε ένα σεισμό.

Η ανεύρεση των γεωμετρικών ιδιοτήτων του ρήγματος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος των σεισμικών κυμάτων, όπως άλλωστε στην οπτική το είδωλο ενός αντικειμένου είναι συνάρτηση του μήκους κύματος του φωτός που το φωτίζει. Για παράδειγμα, επιφανειακά σεισμικά κύματα με περίοδο 20 sec έχουν μήκος κύματος 80 km περίπου. Τα κύματα αυτά είναι κατάλληλα να "δούμε" ένα ρήγμα μήκους 400 km, αλλά δεν μας δείχνουν καλά ένα ρήγμα μήκους μόνο 20 km. Στην τελευταία περίπτωση όλο το ρήγμα αποτυπώνεται σαν ένα σημείο, χωρίς να είναι δυνατόν να διαβαστούν τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά. Αν όμως τα σεισμικά κύματα έχουν μια συχνότητα εκατοστών του δευτερολέπτου, το μήκος κύματός τους είναι αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα, και έτσι ακόμη και το ρήγμα των 400 km αποτυπώνεται σαν ένα σημείο.

Η γεωμετρία ενός ρήγματος καθορίζεται από τους σεισμολόγους εξετάζοντας διάφορα στοιχεία από το σύνολο των σεισμικών κυμάτων που φτάνουν σε ένα σεισμολογικό σταθμό, τον τρόπο διάδοσης των κυμάτων αυτών όπως και από τις προσεισμικές και μετασεισμικές δονήσεις. Είπαμε άλλωστε ότι τα σεισμικά κύματα στην ουσία ακτινογραφούν το εσωτερικό της Γης και ένα σεισμογράφημα έχει την ίδια αξία με μια πλάκα ακτινογραφίας. Η αναφορά στον τρόπο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων γίνεται γιατί οπως οι κεραίες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στέλνουν πολύ ενέργεια προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις και λίγη προς τις υπόλοιπες, έτσι και ένας σεισμός επιλέγει ένα συγκεκριμένο μονοπάτι για να ακτινοβολήσει κάθε φορά τη σεισμική ενέργεια που εκλύει, ανάλογα με το ρήγμα και τον τρόπο διάρρηξής του.

Θα πρέπει δε να αναφέρουμε ότι ειδικά η αναγνώριση της γεωμετρίας ενός ρήγματος μας δίνει ανεκτίμητες πληροφορίες για τις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών και τον τρόπο που αυτές παραμορφώνουν τα πετρώματα. Όταν πρόκειται για διάρρηξη ενός μεγάλου ρήγματος, η εύρεση της γεωμετρίας του υποβοηθιέται και από το εξής γεγονός. Όπως είπαμε η διάρρηξη αρχίζει στο πιο ασθενές σημείο

και στη συνέχεια μεταδίδεται με μια πεπερασμένη ταχύτητα σ' ολόκληρο το ρήγμα. Έτσι, δημιουργούνται σεισμικά κύματα που προέρχονται από διαφορετικές περιοχές του ρήγματος. Η ανάλυση των κυμάτων αυτών (π.χ. η μελέτη των φαινομένων συμβολής που παρατηρούνται) μπορεί εύκολα να καθορίσει τις διαστάσεις του ρήγματος.

4.3 Το μέγεθος των σεισμών

Απομένει τώρα να καθορίσουμε πόσο μεγάλος ή μικρός είναι ένας σεισμός. Για το σκοπό αυτό, μέχρι και πρόσφατα, οι σεισμολόγοι χρησιμοποιούσαν δυο κλίμακες, την κλίμακα Richter και την κλίμακα

Στην πρώτη κλίμακα μετράμε την ολική σεισμική ενέργεια που εκλύθηκε σε ένα σεισμό, ενώ στη δεύτερη μετράμε τις καταστροφές που προξένησε ένας σεισμός. Επειδή η ολική ενέργεια που εκλύεται σε ένα σεισμό έχει μια συγκεκριμένη τιμή, είναι προφανές ότι δυο σεισμογραφοι σε δυο διαφορετικούς τόπους θα πρέπει να καταγράφουν ένα σεισμό με το ίδιο μέγεθος της κλίμακας Richter. Αντίθετα, επειδή οι καταστροφές που προκαλεί ένας σεισμός διαφέρουν από τόπο σε τόπο, ο ίδιος σεισμός θα είναι διαφορετικού μεγέθους στην κλίμακα Mercalli σε δυο διαφορετικούς τόπους.

Ο παρακάτω πίνακας μας δίνει την κατάταξη των σεισμών στην κλίμακα Mercalli.

ΚΛΙΜΑΚΑ MERCALLI

Βαθμός	Αποτελέσματα
1	Δεν γίνεται αισθητός από τους ανθρώπους
2	Αισθητός από μερικούς ανθρώπους που βρίσκονται σε υψηλούς ορόφους
3	Αισθητός από μερικούς που βρίσκονται σε σπίτια
4	Αισθήτός από πολλούς που βρίσκονατι σε σπίτια και από λίγους στην ύπαιθρο. Κρότοι στα παράθυρα και τις πόρτες
5	Αισθητός από όλους που βρίσκονται σε σπίτια και στην ύπαιθρο Ανατροπή μερικών αντικειμένων
6	Ελαφρές βλάβες σε ελάχιστα κτίρια
7	Πέσιμο κεραμιδιών και καπνοδόχων. Μικρές βλάβες σε κτίρια
8	Μερική καταστροφή σε περισσότερα από το 1/4 των κτιρίων
9	Μερική καταστροφή σε περισσότερα από το 1/2 των κτιρίων. Ολική καταστροφή σε περισσότερα από το 1/4 των κτιρίων
10	Μερική καταστροφή σε όλα τα κτίρια. Ολική καταστροφή σε περισσότερα από το 1/2 των κτιρίων. Κατολισθήσεις εδαφών
11	Ολική καταστροφή των κτιρίων. Πολυάριθμες κατολισθήσεις και μεγάλα ρήγματα του εδάφους.
12	Κατάρευση όλων των κτιρίων μέχρι θεμελίων. Τεράστιες παραμορφώσεις του στερεού φλοιού της Γης.

Ο καθορισμός του μεγέθους ενός σεισμού στην κλίμακα Richter είναι αρκετά απλός. Πρώτα οι σεισμολόγοι μετρούν το πλάτος μετατόπισης του εδάφους, όπως το καταγράφει ένας σεισμογράφος για κάποιο καθορισμένο τμήμα του σειρμού των σεισμικών κυμάτων. Στο δεύτερο μέρος διαιρούν το παραπάνω πλάτος με τη μεγεθυντική ικανότητα του συγκεκριμένου σεισμογράφου που το κατέγραψε, ώστε να μάθουν την ακριβή τιμή της εδαφικής μετατόπισης. Στο τρίτο μέρος υπολογίζουν το δεκαδικό λογάριθμο του διορθωμένου πλάτους. Στο τέταρτο μέρος εφαρμόζουν μερικές γνωστές εμπειρικές διορθώσεις στον αριθμό που προέκυψε, που λαβαίνουν υπόψη τους τόσο τη σύσταση του εδάφους στην περιοχή της καταγραφής όσο και την ανταπόκριση του συγκεκριμένου σεισμογράφου στις τοπικές γεωλογικές συνθήκες. Οι εμπειρικές αυτές διορθώσεις είναι απαραίτητες ώστε όλοι οι σεισμογράφοι σε όλους τους σταθμούς να καταγράψουν το ίδιο μέγεθος. Βέβαια αυτό δεν είναι δυνατόν να γίνει με απόλυτη ακρίβεια, και έτσι κάποιες μικρές διαφορές από σταθμό σε σταθμό είναι αναπόφευκτες.

Στην κλίμακα Richter είναι λοιπόν προφανές ότι το βασικό σημείο είναι ποιο τμήμα του όλου σειρμού των σεισμικών κυμάτων θα ληφθεί υπόψη, για την εύρεση του πλάτους της εδαφικής κίνησης. Για παράδειγμα, σε μια μέθοδο λαβαίνεται υπόψη το τμήμα των P κυμάτων με περίοδο ίση περίπου με 1 sec, ενώ σε μια άλλη λαβαίνεται υπόψη το τμήμα των επιφανειακών κυμάτων που έχουν περίοδο 20 sec

Έχοντας υπολογίσει το μέγεθος M του σεισμού, η ολική ενέργεια E_M που εκλύθηκε βρίσκεται από τη σχέση

$$\log E_M = \alpha + \beta M \qquad (2)$$

όπου $\alpha = 11.8$, $\beta = 1.5$.

Έτσι, αν υποθέσουμε ότι έχουμε δυο σεισμούς με μεγέθη M_1 και M_2 ο λόγος λ των ολικών ενεργειών που εκλύουν (που αποτελούν και μέτρο της ισχυρότητας των σεισμών) θα είναι

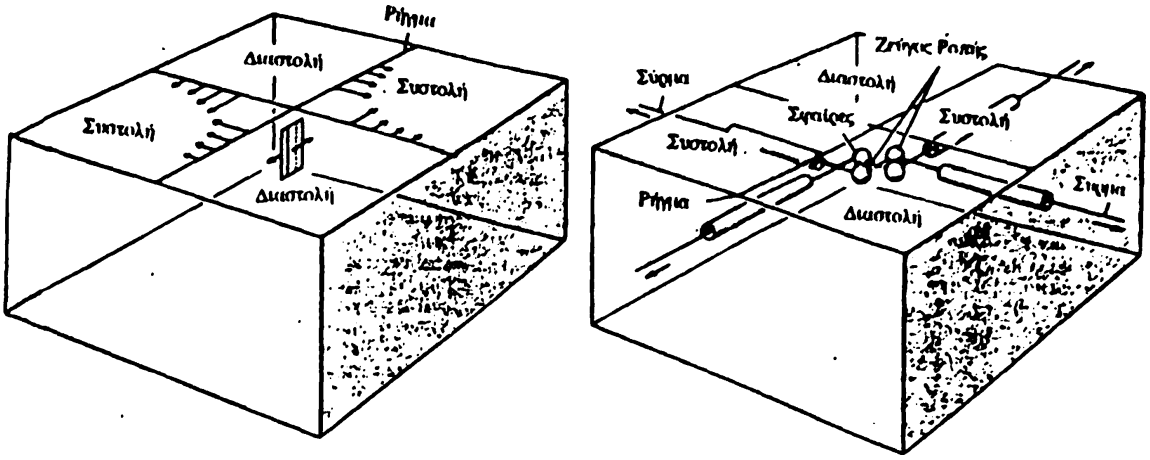
$$\lambda = \frac{E_{M1}}{E_{M2}} = 10^{\beta \Delta M} \quad , \text{ όπου } \Delta M = M_2 - M_1 \qquad (3)$$

Αυτό μας δείχνει ότι όταν ΔΜ = 1, δηλαδή οι σεισμοί διαφέρουν κατά μια μονάδα μεγέθους, τότε η ενέργεια που εκλύει ο ισχυρότερος είναι περίπου 32 φορέςμεγαλύτερη από αυτή που εκλύει ο μικρότερος. Εάν ΔΜ = 2, τότε ο παραπάνω λόγος είναι περίπου ίσος με 1000 κ.ο.κ.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η κλίμακα Richter μας δίνει πιο αντικειμενικές πληροφορίες για τα βασικά χαρακτηριστικά ενός σεισμού. Υπάρχει, όμως, ένα ασθενές σημείο της. Έτσι, οι μεγάλοι σεισμοί (πάνω από 8.5 της κλίμακας Richter) διαρηγνύουν, όπως είπαμε, ρήγματα μήκους εκατοντάδων χιλιομέτρων. Εάν, όμως, ένα ρήγμα είναι αρκετά μεγάλου μήκους, ένα κύμα από το πιο απομακρυσμένο άκρο του χρειάζεται αισθητά περισσότερο χρόνο να φτάσει σε ένα σεισμογράφο απ' ότι ένα κύμα από το πιο κοντινό του άκρο. Αυτό χοντρικά έχει σα συνέπεια το τμήμα του σειρμού των σεισμικών κυμάτων από το οποίο εκτιμιέται το μέγεθος του σεισμού να έχει εκπεμφθεί από μια μικρή σχετικά περιοχή του ρήγματος και όχι από όλη την περιοχή που υπέστη διάρρηξη και εξέπεμψε σεισμική ενέργεια. Έτσι, για τους πολύ μεγάλους σεισμούς η κλίμακα Richter παρουσιάζει "κορεσμό", όπως λέγεται, και υπολογίζει λαθεμένα την ολική ενέργεια που απελευθερώθηκε. Γι' αυτό υπάρχει περίπτωση δυο σεισμοί που εκτιμώνται ότι έχουν μέγεθος για παράδειγμα 8.8 της κλίμακας Richter να εκλύουν στην πραγματικότητα τελείως διαφορετικά ποσά ενέργειας.

Πρόσφατα για τη μέτρηση της έντασης ενός σεισμού έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται μια καινούρια μονάδα μέτρησης, η σεισμική ροπή. Αν και δεν είναι εύκολο να μετρηθεί, όπως το μέγεθος ενός σεισμού στην κλίμακα Richter, εντούτοις αποδίδει πολύ καλύτερα και την ενέργεια που απελευθερώνεται αλλά και τις διαστάσεις της σεισμικής πηγής. Στην ουσία η κλίμακα της ροπής βασίζεται στις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στην καρδιά του σεισμού, εκεί δηλαδή όπου γίνεται η μετατόπιση των πετρωμάτων του ρήγματος, και εξαρτιέται από τα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη μετατόπιση.

Οι χρονικές περίοδοι στις οποίες μετριέται η σεισμική ροπή αυξάνονται καθώς αυξάνονται και οι διαστάσεις του ρήγματος. Εάν το ρήγμα εξετάζεται μέσα



Οταν ένα ρήγμα διαρρηγνύεται τότε υπάρχουν γύρω του περιοχές που διαστέλονται και περιοχές που συστέλονται (αριστερά). Το μήκος κάθε βέλους είναι ανάλογο προς το μέγεθος της διαστολής και συστολής. Ακριβώς τα ίδια πετυχαίνουμε με το μοντέλο της ροπής που δείχνουμε δεξιά. Υπάρχουν δυό ζευγάρια ροπών που ασκούνται πάνω στις μικρές σφαίρες, τα οποία ενώ δίνουν συνολικά μηδέν ροπή προκαλούν τις ίδιες παραμορφώσεις στα πετρώματα που προκαλεί και η πραγματική διάρρηξη του ρήγματος.

Σχήμα 47

από κύματα μεγάλων περιόδων, η μετάβαση από την κατάσταση αποταμιευμένης ελαστικής ενέργειας σ' αυτήν που η ενέργεια έχει εκλυθεί φαίνεται σαν να είναι στιγμιαία. Αποδεικνύεται δε ότι η σεισμική ροπή είναι ίση με το γινόμενο τριών

παραγόντων. Της μέσης μετατόπισης του ρήγματος, της επιφάνειας διάρρηξης και της στερεότητας των πετρωμάτων που διαρηγνύονται. Άρα, αν μας είναι γνωστή η σεισμική ροπή και κάποια άλλα χαρακτηριστικά του ρήγματος, μπορούμε να βρούμε τα υπόλοιπα. Το σημαντικό είναι τελικά ότι η κλίμακα της σεισμικής ροπής μετρά τη σεισμική ενέργεια που εκπέμπει όλο το ρήγμα, και όχι μόνο ένα τμήμα του, και κυρίως ότι δεν παρουσιάζει κορεσμό.

Ο τρόπος με τον οποίο εκλύεται η σεισμική ενέργεια από τη "στιγμιαία" διάρρηξη του ρήγματος στην κλίμακα της ροπής είναι μαθηματικά ισοδύναμος με αυτόν που προβλέπει το μοντέλο του "διπλού ζεύγους". Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στο ότι καθώς οι δυο πλευρές του ρήγματος τρίβονται μεταξύ τους, υπάρχουν δυο περιοχές οι οποίες δέχονται αυξημένη πίεση και συστέλλονται, και δυο στις οποίες συμβαίνει το αντίθετο. Σε κάθε πλευρά του ρήγματος υπάρχει από μια τέτοια περιοχή, έτσι που οι όμοιες περιοχές να συνδέονται χιαστί. Ακριβώς την ίδια παραμόρφωση επιφέρει σε ένα ελαστικό μέσο μια διάταξη στην οποία τέσσερις μικρές σφαίρες έχουν προσαρτημένο ένα λεπτό σύρμα η καθεμιά τους. Τα σύρματα τραβιούνται με ίσες δυνάμεις, έτσι ώστε το ένα ζευγάρι από τις σφαίρες να τείνει να περιστραφεί προς μια κατεύθυνση και το άλλο ζευγάρι προς την αντίθετη. Στο ελαστικό μέσο δρούν, λοιπόν, δυο υποθετικά ζεύγη ροπών, έτσι, όμως, ώστε η συνολική ροπή να είναι μηδέν και το μέσο να μην περιστρέφεται. Οι δυο ροπές παραμορφώνουν, όμως, τελικά το μέσο ακριβώς όπως και ένα ρήγμα, και οδηγούν στη δημιουργία ελαστικών κυμάτων, τα οποία διαδίδονται με τον ίδιο τρόπο που διαδίδονται και τα σεισμικά κύματα. Η ροπή του ζεύγους των δυνάμεων που ασκείται σε ένα ζευγάρι σφαιρών μετρά το μέγεθος του σεισμού στην κλίμακα της ροπής. Όπως η κλίμακα Richter, έτσι και η κλίμακα της ροπής είναι λογαριθμική. Έτσι, π.χ. τρεις διαδοχικοί σεισμοί με μεγέθη ροπής M, M + 1, M + 2, εκλύουν ενέργεια με λόγους 1:32:1000.

4.4 Οι καταστροφές

Το πρώτο μάθημα που μαθαίνει κανένας όταν μελετά τη φύση είναι ότι ενώ οι άνθρωποι μπορούν να διαπραγματεύονται κάποια πράγματα μεταξύ τους, ανάμεσα σ' αυτούς και τους φυσικούς νόμους δεν υπάρχει καμιά διαπραγμάτευση, Ετσι, μιάς και οι σεισμοί είναι το αποτέλεσμα φυσικών νόμων θα εξακολουθήσουν να υπάρχουν για πάντα. Το δεύτερο μάθημα είναι ότι οι σεισμοί δεν σκοτώνουν ποτέ οι ίδιοι ανθρώπους. Αυτό το κάνουν τα κακοκατασκευασμένα κτίσματα και εκείνα που αγνοούν τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Σαν παράδειγμα να αναφέρουμε ότι ο σεισμός του 1989 στη Lomma Prieta στο San Fransisco μεγέθους 7.1 σκότωσε 62 ανθρώπους, ενώ ο σεισμός του 1988 στην Αρμενία μεγέθους 6.7 σκότωσε 25.000 ανθρώπους.

Οι υλικές καταστροφές που προκαλούν τα σεισμικά κύματα είναι αφενός μεν καταστροφές πάνω σε οικοδομές και κάθε είδους ανθρώπινη κατασκευή, αφετέρου δε παραμορφώσεις του εδάφους. Ας εξαιρέσει κανένας διάφορες κακοτεχνίες στις κατασκευές, ο μεγάλος κίνδυνος να υποστούν βλάβες τα χτίσματα οφείλεται στο γεγονός ότι οι ιδιοσυχνότητες ταλάντωσής τους πέφτουν κοντά στις συχνότητες των σεισμικών κυμάτων. Γι' αυτό και στις σεισμογενείς περιοχές απαιτείται ιδιαίτερη ενίσχυσή τους, όπως προβλέπεται από τον αντισεισμικό κανονισμό κάθε χώρας. Ένας σωστός αντισεισμικός σχεδιασμός πρέπει να λαβαίνει υπόψη του όχι μόνο το μέγεθος ενός επικείμενου σεισμού, αλλά και το είδος του εδάφους όπως και των εδαφικών κινήσεων που δημιουργούνται σε ένα σεισμό. Το τελευταίο είναι σημαντικό γιατί, εκτός των άλλων, η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης ενός κτιρίου είναι συνάρτηση και της διεύθυνσης ταλάντωσής του. Σε σχέση με το είδος του εδάφους να σημειώσουμε ότι, γενικά, σεισμικά ακίνδυνα εδάφη θεωρούνται οι βραχώδεις μάζες ενώ σεισμικά επικίνδυνα τα χαλαρά εδάφη. Τα πρώτα έχουν σχηματιστεί πολύ παλιά, ενώ τα δεύτερα είναι συνήθως αποτελέσματα νεώτερων γεωλογικών σχηματισμών.

Για να διαπιστώσει κανένας ότι οι καταστροφές στα διάφορα κτίρια είναι συνάρτηση του ύψους τους αρκεί να κάνει ένα απλό πείραμα. Τοποθετούμε πάνω σε ένα τραπέζι ίδια ποτήρια, στα οποία ρίχνουμε διαφορετικές ποσότητες ενός παχύρευστου ζελέ. Στη συνέχεια κουνάμε ρυθμικά το τρταπέζι από το ένα του άκρο. Θα παρατηρήσουμε τότε ότι το ζελέ μέσα στα ποτήρια κουνιέται κι' αυτό, αλλά άλλο περισσότερο και άλλο λιγότερο. Κάθε ζελέ ταλαντώνεται με ένα χαρακτηριστικό τρόπο, με μιά περίοδο που είναι κύρια συνάρτηση του ύψους του μέσα στο ποτήρι. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με τα διάφορα κτίρια όταν εκδηλωθεί ένας σεισμός.

Μιά οικοδομή με δέκα πατώματα έχει μιά χαρακτηριστική περίοδο ταλάντωσης (ιδιοσυχνότητα) 1 sec, ενώ μιά όμοια κατά τα άλλλα με είκοσι πατώματα έχει μια περίοδο 2 sec. Γενικά υπολογίζεται ότι κάθε επιπλέον όροφος συμβάλει στην αύξηση της ιδιοσυχνότητας μιάς οικοδομής κατά 1/10 sec. Ετσι μιά οικοδομή με πέντε πατώματα έχει ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης 0.5 sec. Οι πιό ισχυρές δονήσεις από ένα σεισμό έχουν περιόδους ανάμεσα στα 2 με 0.2 sec. Ετσι, τα πολύ ψηλά κτίρια δεν έχουν και τόσο μεγάλο φόβο από τους σεισμούς, αντίθετα με ότι θα περίμενε κανένας από μιά πρώτη πρόχειρη σκέψη. Εάν μιά οικοδομή έχει ιδισυχνότητα κοντά στη συχνότητα του σεισμού, τότε ενισχύεται όσο ανεβαίνουμε πιό ψηλά η κίνηση του εδάφους, έτσι που στα τελευταία πατώματα οι οριζόντιες επιταχύνσεις φτάνουν να είναι πολλές φορές οι αντίστοιχες επιταχύνσεις στη βάση. Για παράδειγμα σε μιά οικοδομή με είκοσι πατώματα η συχνότητα που θα την θέσει σε επικίνδυνη ταλάντωση είναι αυτή των 2 sec. Σε μιά τέτοια περίπτωση η οριζόντια επιτάχυνση στο τελευταίο πάτωμα μπορεί να είναι μέχρι και πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτή του πρώτου πατώματος. Η κατακόρυφη επιτάχυνση είναι πάντα πολύ πιό μικρή από την οριζόντια, και ούτως ή άλλως τα διάφορα κτίρια αντέχουν στις κατακόρυφες επιταχύνσεις.

Οι παραμορφώσεις του εδάφους εξαρτώνται κυρίως από την περίοδο των σεισμικών κυμάτων, και από την απόσταση από το επίκεντρο. Έτσι, όπως είπαμε τα σεισμικά κύματα με τη μεγαλύτερη περίοδο δημιουργούν σχεδόν μόνιμες

παραμορφώσεις του εδάφους γύρω από το ρήγμα. Αντίθετα τα κύματα με τη μικρότερη περίοδο πέφτουν μέσα στο ακουστό φάσμα και δεν προκαλούν μεγάλες ζημιές. Οι ζημιές είναι επίσης μικρές όσο απομακρυνόμαστε από το επίκεντρο. Ετσι, στο σεισμό του San Francisco στις ΗΠΑ το 1906, για αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα φράχτες και δρόμοι που διέσχιζαν το ρήγμα μετακινήθηκαν μέχρι και έξι μέτρα. Τα πετρώματα δε παράλληλα στο ρήγμα σχίστηκαν και παραμορφώθηκαν. Στο μεγάλο σεισμό του 1960 στη Χιλή, η μετατόπιση του εδάφους στην περιοχή του ρήγματος έφτασε μέχρι και τα 20 m. Ο ίδιος σεισμός όμως σε απόσταση περίπου 10.000 km έδωσε μέγιστη μετατόπιση του εδάφους μόνο 2 mm.

Όπως είπαμε και στην αρχή, σε ένα σεισμό οι εδαφικές κινήσεις μπορεί να είναι κατακόρυφες, οριζόντιες ή κυκλοειδείς. Οι κινήσεις οι οποίες δημιουργούν τις περισσότερες καταστροφές είναι οι οριζόντιες, γιατί είναι αυτές που θέτουν τα κτίρια σε επικίνδυνες εξαναγκασμένες ταλαντώσεις. Ενώ στο επίκεντρο και σε μικρή απόσταση απ' αυτό κυριαρχεί η κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης, μετά από 15 με 20 km απ' αυτό κυριαρχεί η οριζόντια συνιστώσα. Γι' αυτό και αρκετές φορές οι ζημιές μετά από ένα σεισμό είναι μικρότερες στο επίκεντρο, απ' ότι σε άλλες περιοχές.

Οι καταστροφές που προκαλούνται από μια σεισμική κίνηση του εδάφους όπως και η αισθητότητα του σεισμού είναι άμεσα εξαρτώμενες κυρίως από την επιτάχυνση της κίνησης αυτής. Με τη σειρά της η επιτάχυνση εξαρτιέται ανάλογα από το πλάτος της κίνησης και αντίστροφα ανάλογα από την περίοδο της κίνησης. Αν για παράδειγμα η κίνηση είναι μια απλή ημιτονοειδής, δηλαδή η απομάκρυνση x ενός σημείου του εδάφους από την αρχική του θέση δίνεται από τη σχέση

$$x = x_0 \sin(\omega t) \quad , \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

όπου x_0 το πλάτος της απομάκρυνσης και T η περίοδος της κίνησης, τότε η επιτάχυνση γ της κίνησης θα δίνεται κατ' απόλυτη τιμή από τη σχέση

$$\gamma = \frac{d^2x}{dt^2} = x_0\ \omega^2\ \sin(\omega t) = \frac{4\pi^2 x_0}{T^2}\ \sin(\omega t)$$

Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης πετυχαίνεται όταν $\omega t = 2k\pi$, $k = 0, 1, 2, \ldots$, δηλαδή στα σημεία τα οποία η εδαφική κίνηση αναστρέφεται.

Η εδαφική κίνηση αρχίζει να γίνεται αισθητή από τους ανθρώπους όταν η επιτάχυνσή της γίνει μεγαλύτερη από 0.25 cm/sec^2, δηλαδή μεγαλύτερη από το 1/4000 g, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Όταν η επιτάχυνση γίνει μεγαλύτερη από 5 cm/sec^2 $\left(=\frac{1}{200}g\right)$ η κίνηση του εδάφους αρχίζει να δημιουργεί πια μικρές βλάβες, ενώ για επιτάχυνση μεγαλύτερη των 25 cm/sec^2 $\left(=\frac{1}{40}g\right)$ αρχίζουν μεγάλες βλάβες και καταστροφές. Για επιταχύνσεις μεγαλύτερες των 100 cm/sec^2 $\left(\approx\frac{1}{10}g\right)$ έχουμε καταστροφές σε όλα σχεδόν τα κτίρια, ενώ για επιταχύνσεις μεγαλύτερες από 500 cm/sec^2 $\left(\approx\frac{1}{2}g\right)$ κανένα ανθρώπινο έργο δεν μπορεί να παραμείνει ως έχει.

Γενικά τα μικροσεισμικά φαινόμενα και οι καταστροφές μετά από ένα σεισμό, αν εξαιρέσει κανένας τους τόπους που είναι κοντά στην επικεντρική περιοχή, δεν οφείλονται ούτε στα κύματα επιφάνειας, ούτε στα διαμήκη, αλλά στα εγκάρσια. Κι' αυτό, γιατί είναι τα τελευταία αυτά που μεταφέρουν, από ένα σημείο και πέρα, το σύνολο σχεδόν τη σεισμικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σε μια απόσταση 15 km απο το επίκεντρο, ο λόγος των ενεργειών που μεταφέρουν τα P και S κύματα είναι 1:100.

Πρόσφατα έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές που σκοπό έχουν να μηδενίσουν τις καταστροφιές συνέπειες ενός σεισμού πάνω στα κτίρια. Το πιό αποδοτικό θα ήταν αν μπορούσαμε να "απομονώσουμε" το κτίριο από το έδαφος πάνω στο οποίο στηρίζεται. Μ' άλλα λόγια να βρούμε έναν τρόπο ώστε οι ταλαντώσεις του εδάφους να μην μεταφέρονται στο κτίριο. Όσο κι' αν αυτό φαντάζει παράλογο όμως είναι κατορθωτό. Στην ουσία αυτό που επιχειρείται είναι η παρεμβολή ανάμεσα στο έδαφος και στο κτίριο ενός υλικού που θα απορροφά τις ταλαντώσεις του εδάφους και δεν θα τις μεταφέρει στο κτίριο. Σήμερα όλα τα

σχετικά με αυτό το θέμα βρίσκονται ακόμη στο πειραματικό στάδιο, και δεν θα επεκταθούμε περισσότερο εδώ.

4.5 Πρόβλεψη των σεισμών

Με ποιο τρόπο είναι, όμως, δυνατό να προβλέψουμε την εκδήλωση ενός τόσο καταστροφικού φαινομένου όπως ο σεισμός; Είμαστε σε θέση να τον προαναγγείλουμε, όπως για παράδειγμα προαναγγέλεται μια καταιγίδα ή ένας τυφώνας, ώστε να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα; Κι' αν αυτό σήμερα δεν είναι δυνατό, ποια θα είναι η κατάσταση στο μέλλον; Τα ερωτήματα αυτά είναι γνωστό ότι κυριαρχούν σε όσους είχαν την τύχη να κατοικούν στα όρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών, (περίπου το 1/3 του πληθυσμού της Γης) και άρα και στην Ελλάδα. Και θα έλεγε κανένας ότι πολλοί εκφράζουν την απορία τους, πώς, όταν καταφέρνουμε να στέλνουμε ανθρώπους στο φεγγάρι και διαστημόπλοια στα πέρατα του πλανητικού μας συστήματος, αδυνατούμε να γνωρίζουμε τι συμβαίνει μερικές δεκάδες χιλιόμετρα κάτω από τα πόδια μας.

Είναι αλήθεια ότι σήμερα η επιστήμη διαθέτει ένα πολύ αξιόλογο οπλοστάσιο νόμων και γνώσεων, που της επιτρέπει να πραγματοποιεί τα παραπάνω ταξίδια και να εξηγεί την πλειοψηφία των φαινομένων που παρατηρούνται τόσο στον πλανήτη μας όσο και πολύ μακριά απ' αυτόν. Όσο, όμως, κι αν είσαι κάτοχος ενός νόμου, και μάλιστα ενός απλού νόμου όπως στην πραγματικότητα είναι οι νόμοι της φύσης, άλλο τόσο είναι δύσκολο να εξηγήσεις καμιά φορά ένα φαινόμενο που υπακούει στο νόμο αυτό. Έτσι, σήμερα, σε αντίθεση με ότι συνέβαινε στην εποχή του Νεύτωνα, όλοι μας ξέρουμε γιατί ένα μήλο πέφτει από τη μηλιά στη Γη. Είμαστε, όμως, σε θέση να προβλέψουμε πότε ακριβώς ένα συγκεκριμένο μήλο θα πέσει στη Γη; Για να γίνει κάτι τέτοιο θα πρέπει να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια κάθε στιγμή το βάρος του μήλου και την αντοχή που έχει το κοτσάνι που το κρατά. Ακόμη, όμως, και στην περίπτωση που

γνωρίζουμε και τα δυο αυτά, είναι δυνατό μερικές διαταραχές, όπως για παράδειγμα ένα φύσημα του αέρα, να ρίξουν το μήλο πριν από την ώρα του, και έτσι να μας βγάλουν έξω από τους υπολογισμούς μας. Γι' αυτό, λοιπόν, και η πρόβλεψή μας μπορεί να γίνει μόνο κατά προσέγγιση ενός χρονικού διαστήματος που είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων.

Η κατάσταση με την πρόβλεψη ενός σεισμού είναι ακόμη πιο δύσκολη. Κατ' αρχή να σημειώσουμε ότι πρόβλεψη ενός σεισμού σημαίνει γνώση τριών στοχείων: επίκεντρο, χρόνος εκδήλωσης, μέγεθος σεισμού. Αν ένα από τα τρία αυτά στοιχεία λείπει, τότε η πρόβλεψη έχει σχετική μόνο αξία. Εδώ έχουμε να κάνουμε τώρα με ένα φαινόμενο εντυπωσιακά πολύπλοκο. Έτσι, για να μπορέσουμε να το προσεγγίσουμε θα πρέπει να απαντήσουμε σε ερωτήματα της εξής μορφής. Ποια είναι η ακριβής ταχύτητα των λιθοσφαιρικών πλακών, και ο ρυθμός αποταμίευσης ελαστικής ενέργειας στα πετρώματα; Ποια είναι τα ακριβή χαρακτηριστικά των πετρωμάτων αυτών (χημική σύσταση, αντοχή, θερμοκρασία, πίεση κ.λ.π.). Πόσο ο ρυθμός αποταμίευσης ελαστικής ενέργειας στα πετρώματα και το όριο θραύσης των πετρωμάτων επηρεάζονται από τυχαίους παράγοντες που υπεισέρχονται στην περιοχή του επίκεντρου και ποιοι είναι αυτοί;

Δυστυχώς μέχρι σήμερα δεν είναι δυνατόν να έχουμε ακριβείς απαντήσεις τόσο στα παραπάνω όσο και σε πολλά άλλα σχετικά ερωτήματα, και έτσι η ακριβής ντετερμινιστική πρόβλεψη ενός σεισμού φαίνεται να είναι αδύνατη ή οπωσδήποτε πολύ δύσκολη. Ιάπωνες ερευνητές, πάντως, έχουν μελετήσει με ικανοποιητική ακρίβεια τέτοια ζητήματα, και έχουν υπολογίσει το ρυθμό με τον οποίο συσσωρεύεται ελαστική ενέργεια στα ρήγματα που τους ενδιαφέρουν όπως και το μέγιστο ποσό της ενέργειας που μπορούν να αποταμιεύσουν τα πετρώματα των ρηγμάτων. Έτσι, πιστεύεται ότι θα είναι σε θέση να προβλέψουν με κάποια καλή πιθανότητα την εκδήλωση μεγάλων μελλοντικών σεισμών. Η μέθοδός τους, όμως, θα μπορέσει να θεωρηθεί αποδεκτή μόνο μετά από πολλά χρόνια, όταν οι προβλέψεις τους θα αποδειχτούν πράγματι σωστές για πολλούς σεισμούς. Για να γίνει κάτι τέτοιο κατά κύριο λόγο χρειάζεται πολύ προσεχτική μελέτη της

σεισμικότητας μιας περιοχής, έτσι ώστε να βρεθούν όλα τα χαρακτηριστικά της τα οποία μας ενδιαφέρουν από φυσική σκοπιά. Στον τομέα αυτόν έχει γίνει πολύ λίγη έρευνα, μιας και τα δεδομένα είναι ελάχιστα. Η ακριβής δηλαδή αποτύπωση των σεισμικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής γίνεται τα τελευταία μόνο χρόνια.

Πάντως, η δυσκολία της ντετερμινιστικής πρόβλεψης ενός σεισμού, δεν είναι κάτι που μας κλείνει εντελώς την πόρτα της πρόβλεψης. Γιατί, όπως και σε τόσες άλλες περιπτώσεις, έτσι και εδώ το φαινόμενο του σεισμού περνά από μια φάση "προετοιμασίας", κατά την οποια γύρω από το επίκεντρο, αλλά και σ' αυτό, ο στερεός φλοιός του πλανήτη μας αρχίζει να δείχνει ότι κάτι πρόκειται να επακολουθήσει. Άλλωστε οι δυνάμεις, οι ροπές και οι πιέσεις που ασκούνται στον εστιακό χώρο είναι τόσο μεγάλες που το αντίθετο (η έλλειψη δηλαδή προετοιμασίας) θα ήταν παράξενο. Τα σημάδια αυτής της προετοιμασίας, ή πρόδρομα φαινόμενα όπως λέγονται, είναι αυτά που παίζουν τον πιο καθοριστικό ρόλο στην πρόγνωση ενός σεισμού.

Στις μέρες μας εκατοντάδες γεωφυσικών και γεωλόγων εργάζονται στηριζόμενοι στα πρόδρομα φαινόμενα, κυρίως στις Η.Π.Α., στην Ιαπωνία, την Κίνα και την πρώην ΕΣΣΔ με αντικειμενικό σκοπό την ανακάλυψη μιας μεθόδου πρόγνωσης των σεισμών. Αρκετές φορές στο παρελθόν φάνηκε ότι είμασταν κοντά σε μια τέτοια ανακάλυψη, αλλά τελικά αυτό δεν έγινε. Πολλοί πιστεύουν, πάντως, ότι θα γίνει κάποτε στο μέλλον. Οι πιο απαισιόδοξοι, όμως, θεωρούν ότι η ακριβής πρόβλεψη ενός σεισμού είναι ένα άπιαστο όνειρο. Αν κάνει κανένας ένα απολογισμό πάνω στο θέμα της πρόβλεψης, τότε σ' ολόκληρο τον κόσμο μέχρι σήμερα έχουν προβλεφτεί μόνο μερικές δεκάδες σεισμών, κυρίως στη Ρωσσία, την Ιαπωνία και την Κίνα. Ένας αριθμός μάλλον μικρός, αλλά οπωσδήποτε υπαλογίσιμος. Υπάρχει, παραπέρα, και το μεγάλο, κοινωνικό αυτή τη φορά, πρόβλημα. Ακόμη κι' αν υπάρχει ακριβής πρόβλεψη για ένα σεισμό, τι πρέπει και τι μπορεί να γίνει σε μεγαλουπόλεις όπως το Τόκυο, το Σικάγο, η Αθήνα κ.λ.π.; Πώς μπορεί κανένας να ανακοινώσει έναν επικείμενο σεισμό σε τόσο πυκνοκατοικημένες πόλεις και τι παρανέργειες θα προκύψουν από μια τέτοια

ανακοίνωση; Πώς αντιμετωπίζεται, επίσης, η πιθανότητα μιας πρόβλεψης που δεν είναι σωστή τελικά, πράγμα που θα πρέπει να αναμένεται μιας και κανένας δεν θα είναι ποτέ 100% σίγουρος; Είναι σημαντικό ότι παρ' ότι οι έρευνες στη σεισμολογία προχωρούν με γρήγορο ρυθμό, εντούτοις τα παραπάνω κοινωνικά προβλήματα μόλις τώρα αρχίζουν να εξετάζονται και μόλις τώρα αρχίζουν να διαφαίνονται όλες οι παράμετρές τους και οι δυσκολίες τους.

Η συμπεριφορά μιάς περιοχής κατά την προετοιμασία ενός σεισμού, διαφέρει από την κανονική της συμπεριφορά κύρια σε τρεις παράγοντες, οι οποίοι αναφέρονται α) στη σεισμική δράσης της περιοχής του επίκεντρου, β) στην μεταβολή κάποιων γεωφυσικών μεγεθών, και γ) στη συμπεριφορά του ίδιου του σστερεού φλοιού. Πράγματι, είναι σήμερα βέβαιο ότι πριν από την εκδήλωση ενός μεγάλου σεισμού καταγράφονται γύρω από το επίκεντρο μια σειρά από ανώμαλες συμπεριφορές κάποιων ποσοτήτων. Εξετάζοντας το ποσοστό της ανώμαλης αυτής συμπεριφοράς όπως και τη διάρκειά της, οι σεισμολόγοι πορσπαθούν να προβλέψουν τόσο το χρόνο που θα εκδηλωθεί ένας σεισμός, όσο και το μέγεθός του. Οι συμπεριφορές των παραπάνω ποσοτήτων πριν από την εκδήλωση ενός σεισμού είναι σύμφωνες με τη θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, δεν μπορούν όμως όλες τους να ερμηνευτούν μόνο απ' αυτή. Χρειάζονται και κάποια επιπλέον στοιχεία που θα αναφέρονται στο μηχανισμό προετοιμασίας του σεισμού. Όπως έχουμε 'πεί, η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών μπορεί να ερμηνεύσει τη συσσώρευση ελαστικής ενέργειας σε ένα πέτρωμα, η απότομη έκλυση της οποίας θα δώσει ένα σεισμό. Χρειαζόμαστε όμως και μια ακριβή θεώρηση του τι ακριβώς σημαίνει για τη φυσική και τη χημεία των πετρωμάτων η συνεχής συσσώρευση της παραπάνω ελαστικής ενέργειας, και κυρίως τη συμπεριφορά τους όταν η ενέργεια αυτή ξεπεράσει ένα κρίσιμο όριο και επίκειται η απότομη απελευθέρωσή της.

Η θεωρία της διασταλτικότητας

Η θεωρία που πιστεύουμε σήμερα ότι περιγράφει καλύτερα τη συμπεριφορά των πετρωμάτων πριν την εκδήλωση ενός μεγάλου σεισμού είναι αυτή της διασταλτικότητας των πετρωμάτων του εστιακού χώρου. Σύμφωνα με παρατηρήσεις που έχουν ιστορία από το 1886, η διασταλτικότητα είναι μια μη ελαστική αύξηση του όγκου των πετρωμάτων η οποία οφείλεται στη δημιουργία μικρορωγμών που διευθύνονται παράλληλα στον άξονα της μέγιστης συμπίεσης και οι οποίες διογκώνονται κατά τον άξονα της ελάχιστης συμπίεσης. Η τιμή της πίεσης πάνω από την οποία αρχίζει η αύξηση του όγκου εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και από τις αρχικές συνθήκες. Υπάρχουν, όμως, ενδείξεις ότι αρχίζει μόλις η πίεση περάσει το 50% της κρίσιμης τιμής που οδηγεί σε διάρρηξη του πετρώματος. Είναι σημαντικό δε ότι η θεωρία της διασταλτικότητας έχει επιβεβαιωθεί και από εργαστηριακά πειράματα, τα οποία μάλιστα έδωσαν και πρόσθετα στοιχεία πέρα από αυτά των άμεσων παρατηρήσεων στο χώρο του σεισμού. Ας δούμε κάπως πιο λεπτομερειακά, λοιπόν, τη θεωρία της διασταλτικότητας των πετρωμάτων.

Τόσο από εργαστηριακά πειράματα όσο και από απευθείας παρατηρήσεις σε σεισμογενείς περιοχές, έχει διαπιστωθεί ότι όταν ένα πέτρωμα συμπιέζεται παραμορφώνεται και τελικά διαρρηγνύεται. Αρχικά η συμπίεση του πετρώματος μειώνει τον όγκο του και κλείνουν όλοι οι πόροι που αρχικά αυτό είχε. Καθώς όμως η πίεση αυξάνει και πριν την τελική του διάρρηξη διαστέλεται, λόγω του ότι δημιουργούνται σ' αυτό μικροσκοπικές ρωγμές, όπως είπαμε, σαν χαραμάδες. Αυτό ακριβώς είναι που οδηγεί σε μια μη ελαστική αύξηση του όγκου του πετρώματος. Μερικοί μάλιστα υποστηρίζουν ότι η δημιουργία ρωγμών σε ένα πέτρωμα γίνεται με ένα ρυθμό γεωμετρικής προόδου από ένα σημείο και πέρα, έχουμε δηλαδή ένα φαινόμενο χιονοστιβάδας. Το σίγουρο, πάντως, είναι ότι η ύπαρξη των ρωγμών αυτών αλλάζει πια σημαντικά τις φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων, κυρίως γιατί στις ρωγμές αυτές έχουμε ροή νερού. Έτσι, λοιπόν,

από την πρώτη φάση στην οποία αρχίζει η σταδιακή συσσώρευση ελαστικής ενέργειας σε ένα πέτρωμα, περνάμε στη δεύτερη φάση προετοιμασίας του σεισμού, κατά την οποία το πέτρωμα έχει διασταλεί και οι ρωγμές του έχουν γεμίσει με νερό. Η τρίτη φάση που ακολουθεί θα μας φέρει τελικά στο κύριο γεγονός, δηλαδή στο σεισμό.

Για τις δυναμικές διεργασίες οι οποίες συμβαίνουν στον εστιακό χώρο κατά την τρίτη φάση, υπάρχουν διάφορες απόψεις. Κυρίως μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε εάν το νερό που εισχωρεί στις ρωγμές διαστολής παίζει κάποιο ρόλο ή όχι στην τελική διάρρηξη του πετρώματος και τι είναι εκείνο το οποίο δρα καταλυτικά στην αστάθεια και τελικά στη διάρρηξη του εστιακού χώρου. Το νερό για παράδειγμα, ενδέχεται να μειώνει την τριβή και να οδηγεί σε μια πιο γρήγορη διάρρηξη. Όλα αυτά αποτελούν τώρα αντικείμενο μελέτης σε πολλά εργαστηριακά πειράματα, και πιστεύεται ότι σύντομα θα γνωρίζουμε πλήρως τη φυσική συμπεριφορά των πετρωμάτων πριν από το κύριο γεγονός.

Σε σχέση, μάλιστα, με το ρόλο του νερού στην εκδήλωση ενός σεισμού πολλοί ερευνητές διατύπωσαν την άποψη ότι ίσως είναι δυνατός ο έλεγχος της σεισμικότητας μιας περιοχής με πρόσθεση ή αφαίρεση νερού στα πετρώματα. Η όλη ιστορία ξεκίνησε μάλλον τυχαία όταν αποκαλύφθηκε ότι όταν τα υγρά απόβλητα μιας περιοχής στο Denver των Η.Π.Α. διοχετεύθηκαν σε ένα βαθύ όρυγμα, αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την πυροδότηση μικρών σεισμών. Η εξήγηση που δόθηκε ήταν ότι η εισαγωγή του νερού στα πετρώματα μείωσε την τριβή και επομένως δεν επέτρεψε τη μεγάλη συσσώρευση ελαστικής ενέργειας σ' αυτό. Έτσι η σεισμική ενέργεια απελευθερώθηκε με πολλούς μικρούς σεισμούς. Αντίθετα η έλλειψη νερού ίσως αυξάνει την τριβή και επιτρέπει μεγάλη συσσώρευση ελαστικής ενέργειας η οποία απελευθερώνεται με ένα μεγάλο σεισμό. Βέβαια, ακόμη κι' αν επιβεβαιωθεί ο ρόλος του νερού στην εκδήλωση ενός σεισμού, είναι προφανές ότι ο έλεγχος της σεισμικότητας μιας περιοχής μέσω αυτού αναφέρεται στο απώτερο μέλλον.

Από την άποψη, όμως, της πρόβλεψης, οι σεισμολόγοι ενδιαφέρονται για τα πρόδρομα φαινόμενα της δεύτερης κυρίως φάσης. Από μια πρώτη προσέγγιση διαπιστώθηκε ότι υπάρχει στενή σχέση ανάμεσα στη διάρκεια αυτών των φαινομένων και στο μέγεθος του επεικείμενου σεισμού. Πριν όμως προχωρήσουμε σε κάποιες λεπτομέρειες για τα ακριβή χαρακτηριστικά των πρόδρομων φαινομένων, θα συζητήσουμε τον τρόπο με τον οποίο εκτιμιέται η σεισμικότητα μιας περιοχής. Θα δούμε δηλαδή με ποια διαδικασία μια περιοχή που βρίσκεται κοντά στα όρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών αναμένεται να δώσει γενικά, σεισμούς μεγάλων ή μικρών μεγεθών. Γιατί θα πρέπει να είναι προφανές ότι όλες οι σεισμογενείς περιοχές δεν δίνουν πάντα τα ίδια μεγέθη σεισμών. Άλλωστε οι λιθοσφαιρικές πλάκες έχουν πολλά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (ταχύτητα, μέγεθος, είδος πετρωμάτων κ.λ.π.) που τις διαφοροποιούν μεταξύ τους.

Η στατιστική μέθοδος πρόγνωσης των σεισμών

Όπως έχουμε 'δεί στα προηγούμενα, οι σεισμοί δεν έχουν μια τυχαία κατανομή στον πλανήτη μας, αλλά παρατηρούνται σε ορισμένες περιοχές, οι οποίες εύκολα ταυτίζονται με τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών που αναπτύσσουν τριβές. Κάθε φορά που η συσσωρευμένη ενέργεια στα πετρώματα εκλύεται απότομα τότε έχουμε ένα σεισμό. Η κίνηση, όμως, των πλακών συνεχίζεται και έτσι είναι επόμενο τα πετρώματα να ξανααποταμιεύσουν ενέργεια, την οποία θα εκλύσουν και πάλι απότομα, δηλαδή να ξαναέχουμε σεισμό. Στη βάση αυτής της απλής παρατήρησης στηρίζεται η λεγόμενη Στατιστική Μέθοδος Πρόγνωσης των Σεισμών (ΣΜΠΣ). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η σεισμικότητα μιας περιοχής μπορεί να καθοριστεί με στατιστικές μεθόδους από τη σεισμική προϊστορία της. Τέτοιες μέθοδοι υπάρχουν πολλές. Η πιο απλή απ' αυτές μας λέει ότι ο μέσος αριθμός $\langle N_k \rangle$ των σεισμών που έχουν μέγεθος M ή μεγαλύτερο και

γίνονται σε χρονικό διάστημα k ετών σε μια ορισμένη περιοχή, δίνεται από τη σχέση

$$\log\langle N_k\rangle = a_k - bM \qquad (4)$$

όπου a_k και b είναι κάποιοι παράμετροι, οι οποίοι χαρακτηρίζουν την περιοχή που εξετάζουμε. Για να καθοριστούν με ακρίβεια οι παράμετροι αυτοί μας χρειάζεται μια μεγάλη σεισμική προϊστορία της περιοχής, πράγμα που συνήθως είναι δύσκολο. Κι' αυτό γιατί ακριβείς καταγραφές σεισμών έχουμε μόνο από την εποχή που λειτουργούν σεισμολογικοί σταθμοί. Διαφορετικά είμαστε αναγκασμένοι να καταφύγουμε σε ιστορικά κείμενα και αναφορές με τα αναπόφευκτα λάθη που υπάρχουν εκεί.

Η παράμετρος b βρίσκεται στο διάστημα $1.5 \geq b \geq 0.5$, αλλά ακόμη και για την ίδια περιοχή παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις, όπως θα δούμε. Γνωρίζοντας την τιμή της μπορούμε εύκολα να καθορίσουμε τη σχετική πιθανότητα παρατήρησης σεισμών διαφορετικού μεγέθους. Για παράδειγμα, αν b = 1, τότε έχουμε την ίδια πιθανότητα να παρατηρήσουμε ένα σεισμό μεγέθους M+1 με δέκα σεισμούς μεγέθους M. Για τον Ελληνικό χώρο βρίσκεται ότι

$$a_k = 8.25 \text{ και } b = 1.00.$$

Για χρονικό διάστημα ενός έτους, η σχέση (4) γίνεται

$$\log\langle N\rangle = a - bM \qquad (5)$$

όπου $a = a_k - \log k$ είναι η ανηγμένη τιμή της παραμέτρου a. Επειδή για την εξαγωγή της τιμής των παραμέτρων a_k και b χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές η προϊστορία 75 χρόνων, εύκολα προκύπτει ότι

$$a = 8.25 - \log 75 = 6.37$$

Άρα η (5) γίνεται

$$\log\langle N\rangle = 6.37 - 1.00M \qquad (6)$$

Η σχέση αυτή μας δίνει το μέσο αριθμό N των σεισμών που έχουν μέγεθος M ή μεγαλύτερο και γίνονται σε ορισμένη περιοχή σε διάστημα ενός έτους. Από τη (6) έχουμε

$$\langle N\rangle = 10^{a-bM} \qquad (7)$$

Για ένα διάστημα t ετών από κάποια ημερομηνία, ο αριθμός N των σεισμών που θα γίνουν και θα έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από M θα δίνεται επομένως από τη σχέση

$$N = \langle N \rangle t = 10^{a-bM}\, t \qquad (8)$$

και ο υπολογισμός θα είναι τόσο πιο σωστός όσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα των t ετών. Άρα σ' αυτό το διάστημα κάθε $T_m = 10^{bM-a}$ έτη θα γίνεται και ένας σεισμός με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Η T_m είναι η μέση περίοδος επανάληψης ενός σεισμού με μέγεθος M ή μεγαλύτερο. Για τον Ελληνικό χώρο για M = 5 παίρνουμε $T_m = 10^{5-6.37}$ έτη $= 10^{-1.37}$ έτη ≈ 0.0426 έτη ≈ 16 ημέρες. Για M = 7 παίρνουμε $T_M = 10^{7-6.37}$ έτη ≈ 4.26 έτη κ.λ.π.

Λύνοντας τη σχέση (8) ως προς M θα έχουμε

$$M = \frac{\log t + a}{b} - \frac{\log N}{b} \qquad (9)$$

Ο σεισμός επομένως (N=1) που θα έχει το μεγαλύτερο μέγεθος M_{max} στο διάστημα των t ετών θα χαρακτηρίζεται από μέγεθος

$$M_{max} = \frac{\log t + a}{b} \qquad (10)$$

Για τον Ελληνικό χώρο, για t = 1 έτος

$$M_{max} = 6.4$$

για t = 2 έτη

$$M_{max} = 6.7$$

κ.λ.π.

Όπως είναι προφανές από τα παραπάνω, η ΣΜΠΣ δεν έχει αξία τόσο ως προς το ότι καταφέρνει να υπολογίσει το χρόνο που θα εκδηλωθεί ο σεισμός, όσο ως προς το ότι καθορίζει τα χαρακτηριστικά του σεισμού και κυρίως το μέγεθός του. Παρουσιάζει έτσι σημαντικό ενδιαφέρον στον κανονισμό αντισεισμικής προστασίας μιας περιοχής, δηλαδή στον καθορισμό των σεισμικών δυνάμεων οι οποίες αναμένεται να επιδράσουν πάνω στις τεχνικές κατασκευές.

Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών όπως και οι διάφορες στατιστικές μέθοδοι, μας βοηθάνε να ανακαλύψουμε και να χαρτογραφήσουμε τις σεισμογενείς περιοχές, δηλαδή τις περιοχές στις οποίες είναι δυνατόν να εκδηλωθεί ένας σεισμός. Παρ' ότι βέβαια οι στατιστικές μέθοδοι πάνε λίγο παραπέρα και έχουν να μας 'πούν κάποια πράγματα και για το πιθανό μέγεθος του επικείμενου σεισμού, εντούτοις είναι πολύ επικίνδυνο να μείνει κανένας μόνο σ' αυτές. Θα πρέπει δε να σημειώσουμε ότι σε μερικές περιπτώσεις, κατά τις οποίες επεκράτησε η αντίληψη ότι η προϊστορία μιας σεισμικής περιοχής σχεδόν επαναλαμβάνεται και δε μπορεί να δώσει σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα απ' αυτά που παρατηρήθηκαν στο παρελθόν, αυτό οδήγησε σε καταστροφικά αποτελέσματα.

Πρόγνωση σεισμών από πρόδρομα φαινόμενα

Ας έρθουμε τώρα να συζητήσουμε τα σχετικά με την προετοιμασία ενός μεγάλου σεισμού και ποια είναι εκείνα τα πρόδρομα φαινόμενα που συμμετέχουν στην προετοιμασία αυτή. Γενικά, τα πρόδρομα φαινόμενα μπορούμε να τα χωρίσουμε σε τρεις κατηγορές. Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται τα φαινόμενα που σχετίζονται με σεισμούς με μέγεθος πάνω από 5 της κλίμακας Richter και ο χρόνος εκδήλωσής τους είναι ανεξάρτητος από το συγκεκριμένο μέγεθος του σεισμού. Ο χρόνος αυτός πάντως είναι της τάξης μερικών ωρών πριν από την εκδήλωση του σεισμού. Δηλαδή ο χρόνος αυτός ικανοποιεί μια σχέση της μορφής

$$\log T = -1 \qquad (11)$$

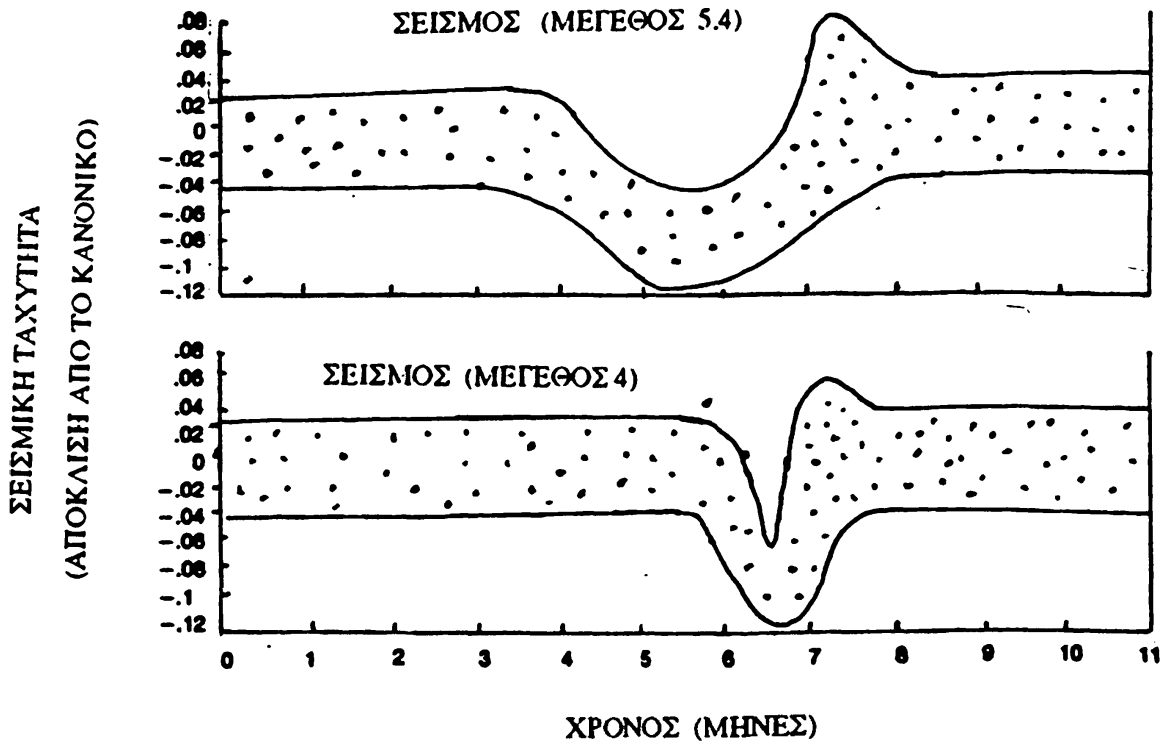
Στη δεύτερη κατηγορία υπάγονται τα φαινόμενα των οποίων ο χρόνος εκδήλωσης είναι συνάρτηση του μεγέθους του σεισμού. Μάλιστα βρέθηκε ότι όλα τα φαινόμενα αυτά έχουν χρόνο εκδήλωσης T σε ημέρες ο οποίος συνδέεται με το μέγεθος M του σεισμού περίπου με την ίδια σχέση, η οποία είναι

$$M = 1.316 \log T + 2.41 \qquad (12)$$

Έτσι, για ένα μικρό σεισμό με M=3 έχουμε $T = 10^{0.45}$ ημέρες ≈ 3 ημέρες, ενώ για ένα μεγάλο σεισμό με M = 8 έχουμε $T = 10^{4.15}$ ημέρες ≈ 49 χρόνια. Γενικά $\frac{T_{M+1}}{T_M}$ $= 10^{0.76} = 5.62$. Τέλος στην τρίτη κατηγορία υπάγονται τα φαινόμενα των οποίων ο χρόνος εκδήλωσης εμφανίζει να έχει μια τυχαία σχέση με το μέγεθος του σεισμού, η οποία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί προφανώς για ακριβή πρόβλεψη.

Ποσότητες οι οποίες δείχνουν μια ανώμαλη συμπεριφορά πριν από ένα σεισμό, και αυτό μπορεί να αποτελέσει στοιχείο πρόβλεψής του, είναι οι ταχύτητες των κυμάτων που διαδίδουν τα πετρώματα, οι ηλεκτρικές και μαγνητικές τους ιδιότητες, η στάθμη των υπόγειων νερών και η περιεκτικότητά τους σε συγκεκριμένα στοιχεία κ.λ.π. Εδώ θα εξετάσουμε τις πιο βασικές απ' αυτές.

Θα ξεκινήσουμε με τη μεταβολή που υφίσταται η ταχύτητα των κυμάτων που διαδίδουν τα πετρώματα κοντά στον εστιακό χώρο. Η μεταβολή αυτή αντανακλάται στη μεταβολή που υφίσταται ο λόγος λ της ταχύτητας υ_p των διαμήκων κυμάτων προς την ταχύτητα υ_s των εγκάρσιων κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα ο λόγος λ παρουσιάζει μια μείωση της τιμής του κατά το 2ο στάδιο προετοιμασίας ενός σεισμού. Το 1969 πρώτοι οι Ρώσσοι επιστήμονες έδειξαν ότι πριν από πολλούς σεισμούς μεσαίου μεγέθους ο λόγος λ ελαττώθηκε περίπου μέχρι και 6%. Το μέγεθος του σεισμού που ακολούθησε δεν είχε σχέση με το ποσοστό μείωσης, αλλά με το χρόνο παρατήρησης του φαινομένου. Τα δεδομένα που εξέτασαν τους έδειξαν για παράδειγμα ότι για σεισμούς με μέγεθος 5 ο χρόνος παρατήρησης ήταν ένας με τρεις μήνες. Ο λόγος λ ξαναγύρισε στην κανονική του τιμή περίπου λίγο πριν από το χρόνο εκδήλωσης του σεισμού. Μετά απ' αυτές τις πρώτες παρατηρήσεις η επιβεβαίωση ήρθε και από άλλες χώρες που αντιμετώπιζαν σχετικά προβλήματα.



Το 1969 Ρώσσοι σεισμολόγοι κατέγραψαν την παραπάνω μεταβολή του λόγου λ πριν από δυό μεγάλους σεισμούς 5.4 και 4 αντίστοιχα. Κάθε σημείο παριστά και μιά τιμή του λόγου λ.

Σχήμα 48

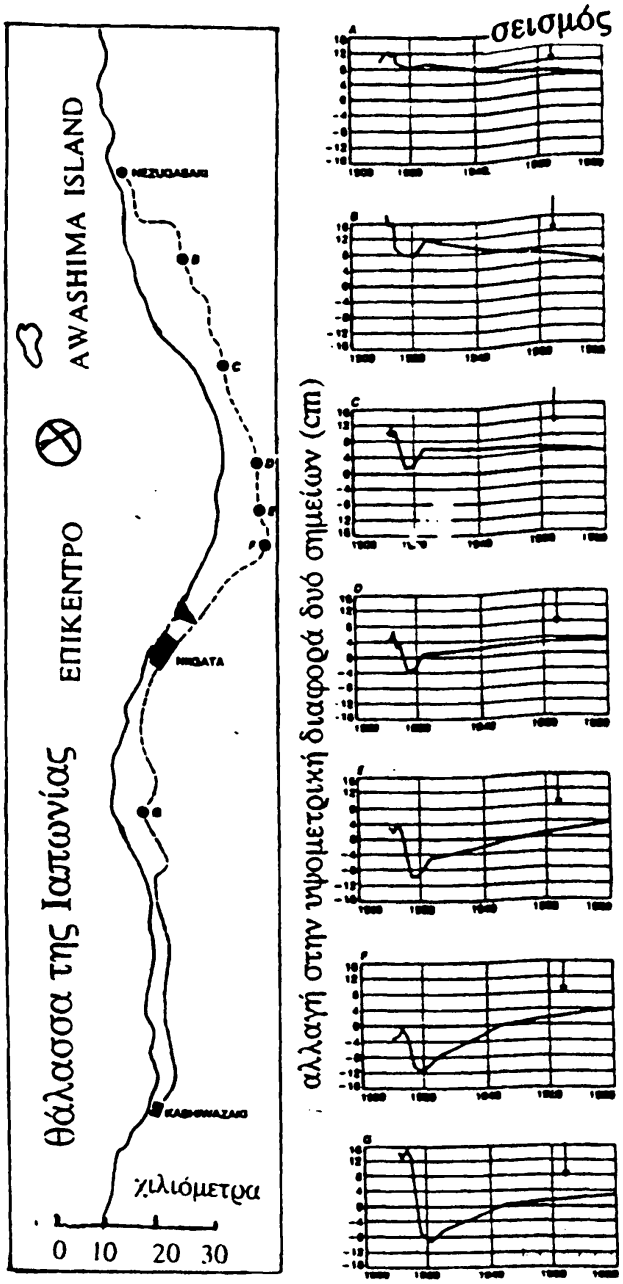
Στις Η.Π.Α. για παράδειγμα στο σεισμό του San Fernando στην Καλιφόρνια, η μείωση του λόγου λ ήταν της τάξης του 10%. Διήρκεσε περίπου 3.5 χρόνια και ο σεισμός ήταν μεγέθους 6.4. Αμέσως άρχισε μια μεγάλη ερευνητική προσπάθεια για να μελετηθεί το φαινόμενο αυτό σε όλες του τις λεπτομέρειες. Πράγματι δε τα εργαστηριακά πειράματα επιβεβαίωσαν αμέσως τα συμπεράσματα των άμεσων

παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, στα πρώτα εργαστηριακά πειράματα που έγιναν για παράδειγμα στο Caltech παρατηρήθηκε μείωση του λ μέχρι και 15%. Τα ίδια πειράματα έδειξαν ότι η μεταβολή της τιμής του λ οφείλεται σε μεταβολή της τιμής της υ_p κυρίως, και πολύ ελάχιστα στη μεταβολή της τιμής της υ_s. Η μεγάλη μεταβολή της ταχύτητας υ_p των διαμήκων κυμάτων εξηγείται από τη θεωρία της διασταλτικότητας των πετρωμάτων και το αποτέλεσμα που έχει αυτή στις φυσικές τους ιδιότητες, όπως επίσης και στις αυξημένες ποσότητες νερού που απορροφούν οι ρωγμές που ανοίγονται, όπως θα δούμε παρακάτω.

Στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου του Kyoto στην Ιαπωνία, έχουν γίνει πειράματα για να εξακριβωθεί τι ακριβώς συμβαίνει με τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων πριν από ένα μεγάλο σεισμό. Συγκεκριμένα, δείγματα γρανιτικών πετρωμάτων υπέστησαν μιαν αρχική ομοιόμορφη πίεση, όπως ακριβώς συμβαίνει όταν βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης. Η πίεση αυτή έφτασε μέχρι και τα 4 kbars, που αντιστιχεί σε βάθος λίγο μεγαλύτερο από τα 11 km. Τα πετρώματα στη συνέχεια δέχτηκαν μιαν επιπλέον πίεση κατά μια ορισμένη διεύθυνση, όπως συμβαίνει όταν επίκειται σεισμός, η οποία έφτανε μέχρι και το όριο θραύσης τους. Μετριόταν δε στη συνέχεια η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων υ_p, τόσο κατά την παραπάνω διεύθυνση όσο και κάθετα σ' αυτή. Όταν η αρχική και η επιπλέον πίεση είναι μικρές, η υ_p αυξάνει και κατά τις δυο διευθύνσεις, καθώς οι πόροι και οι ρωγμές του υλικού κλείνουν, και επιτρέπεται έτσι γρηγορότερη διάδοση των κυμάτων. Όταν, όμως, η αρχική πίεση είναι μεγάλη το παραπάνω αποτέλεσμα εξαφανίζεται, και εμφανίζεται μια καινούρια συμπεριφορά στην ταχύτητα υ_p.

Όταν η αρχική πίεση είναι περίπου 1 kbar, η ταχύτητα κατά τη διεύθυνση της επιπλέον πίεσης παραμένει σχεδόν αμετάβλητη, ή μεταβάλεται το πολύ μέχρι 3% μέχρι που φτάνουμε στο όριο θραύσης του πετρώματος. Από την άλλη μεριά, η ταχύτητα που είναι κάθετη στη διεύθυνση της επιπλέον πίεσης αρχίζει να πέφτει σημαντικά, μόλις η πίεση αυτή περάσει το μισό του όριου θραύσης. Στο όριο θραύσης η ταχύτητα έχει πέσει περίπου κατά 3.8%, όταν η αρχική πίεση είναι 400

bars, και κατά 20% όταν η αρχική πίεση είναι 3.5 kbars. Οι πιέσεις αυτές αντιστοιχούν σε βάθη 1 km και 10 km στο εσωτερικό της Γης.



Η ανώμαλη κατακόρυφη μεταβολή που παρατηρήθηκε στη περιοχή Niigata της Ιαπωνίας κράτησε γύρω στα 10 χρόνια πριν από την εκδήλωση ενός καταστροφικού σεισμού μεγέθους 7.5. Τα σχεδιαγράμματα δείχνουν τις μετρήσεις της κατακόρυφης απόστασης δυό σημείων.

Σχήμα 49

Τα πειράματα αυτά επαναλήφθηκαν και σε πετρώματα στα οποία μπορούσαν να οριστούν άξονες μέγιστης ελάχιστης και ενδιάμεσης πίεσης. Βρέθηκε τότε ότι καθώς τα πετρώματα πλησίαζαν στο όριο θραύσης τους, τόσο η ταχύτητα υ_p των διαμήκων κυμάτων όσο και η ταχύτητα υ_s των εγκάρσιων κυμάτων μειωνόντουσαν και κατά τους τρεις άξονες, αλλά κατά εντελώς διαφορετικό τρόπο. Έτσι, ο λόγος $\lambda = \upsilon_p/\upsilon_s$ μεταβαλόταν ελάχιστα κατά τη διεύθυνση της μέγιστης πίεσης, έπεφτε κατά 2% κατά τη διεύθυνση της ενδιάμεσης πίεσης και κατά 12% κατά τη διεύθυνση της ελάχιστης πίεσης. Κανονικά, ο λόγος λ έχει τιμή $\lambda = 1.75$.

Όπως είπαμε και προηγούμενα από τη στιγμή που ο λόγος λ σταματά την ανώμαλη συμπεριφορά του και αρχίζει να επιστρέφει στις κανονικές του τιμές, είναι πια σίγουρο ότι ο σεισμός πλησιάζει. Και ενώ από το χρόνο που διήρκεσε το φαινόμενο μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθός του, η ακριβής στιγμή που θα συμβεί παραμένει μέχρι σήμερα αρκετά αβέβαιη, ώστε να προχωρήσει, για παράδειγμα, κανένας σε ανακοίνωση και σε εκκένωση των επικίνδυνων περιοχών.

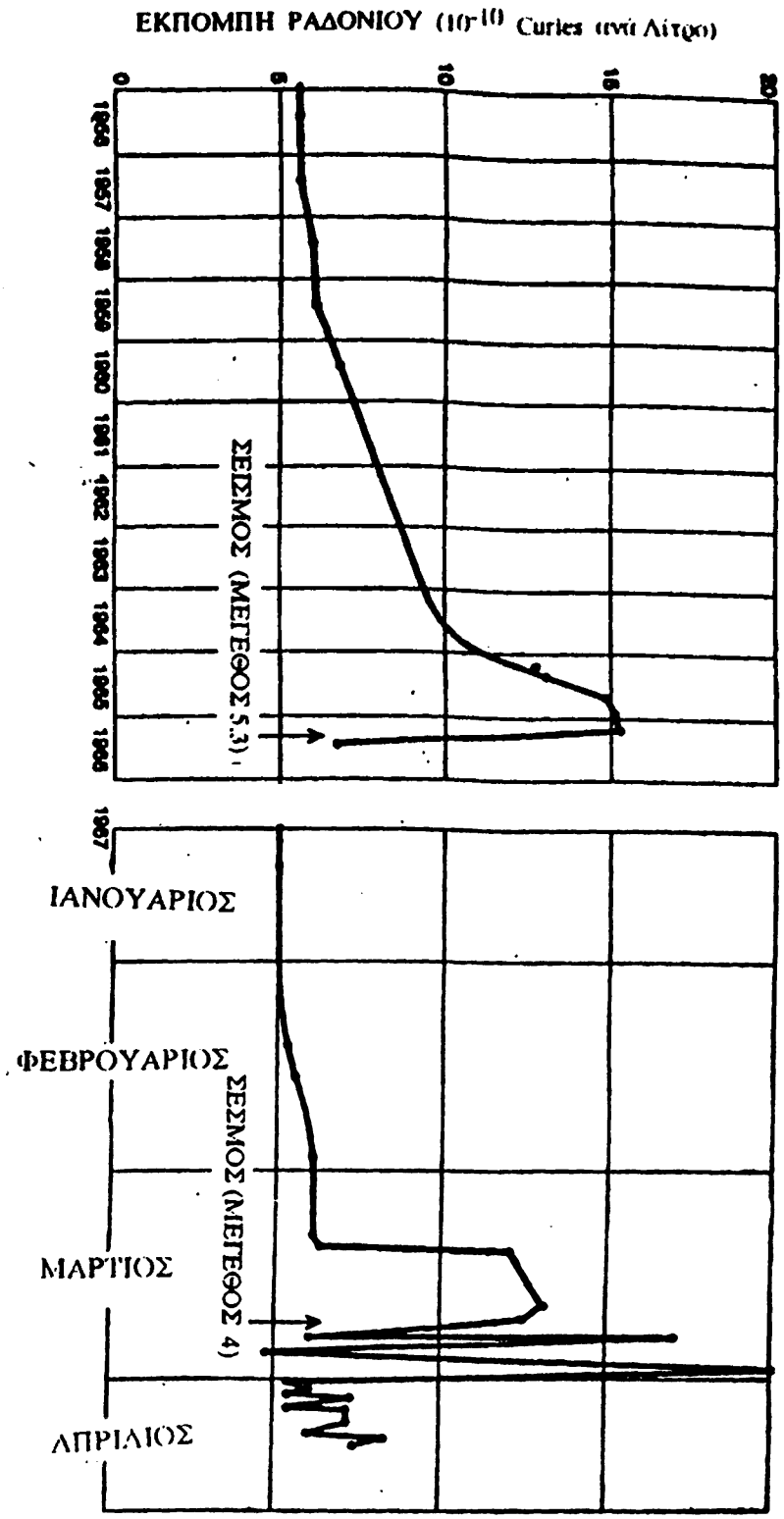
Το μέγεθος του επικείμενου σεισμού όπως αναφέραμε φαίνεται να είναι ανεξάρτητο από το ποσοστό πτώσης του λόγου λ, εξαρτιέται όμως από το χρόνο που ο λόγος αυτός απέχει από την
κανονική του τιμή. Έτσι, για χρόνο 30 ημερών ο σεισμός που ακολουθεί έχει μέγεθος 4, για χρόνο 90 ημερών ο σεισμός έχει μέγεθος 5.5, για χρόνο 3.5 ετών ο σεισμός έχει μέγεθος 6.5, και για χρονο 10 ετών πλησιάζει το μέγεθος 7.5. Στην ουσία, η εύρεση της τιμής του λόγου λ είναι μια σχετικά λεπτομερειακή ακτινογραφία του εστιακού χώρου και των φυσικών του ιδιοτήτων. Γι' αυτό και η μέθοδος πρόβλεψης ενός σεισμού που στηρίζεται σ' αυτή θεωρείται από τις πιο αξιόπιστες και από αυτές που υπόσχονται τα πιο πολλά.

Ένα δεύτερο σημαντικό πρόδρομο φαινόμενο είναι αυτό που αναφέρεται σε παραμορφώσεις του στερεού φλοιού. Όπως είναι προφανές κατά το στάδιο προετοιμασίας ενός σεισμού, ο στερεός φλοιός βρίσκεται κάτω από την επίδραση ισχυρών τάσεων, ροπών κ.λ.π., οι οποίες είναι αναπόφευκτο να του δημιουργούν

κάποιες παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις αυτές μπορεί να είναι οριζόντιες ή κατακόρυφες μεταβολές ή μεταβολές της κλίσης του εδάφους. Οι οριζόντιες μεταβολές είναι επιβραχύνσεις ή επιμηκύνσεις του εδάφους. Μια απόσταση δηλαδή μήκους L ανάμεσα σε δυο σταθερά σημεία A και B πριν από την εκδήλωση ενός σεισμού υφίσταται μια μεταβολή ΔL, έτσι ώστε να έχουμε πριν από το σεισμό (AB) = L + ΔL, όπου ΔL θετικό ή αρνητικό. Με κατάλληλα όργανα επομένως (γεωδίμετρα) παρακολουθούμε ανά τακτά χρονικά διαστήματα την απόσταση δυο σταθερών σημείων A και B και παρατηρούμε τις μεταβολές στην απόστασή τους.

Οι κατακόρυφες μεταβολές αναφέρονται στη μεταβολή Δh της υψομετρικής διαφοράς δυο σταθερών σημείων A και B. Σε πολλές περιπτώσεις η υψομετρική διαφορά αναφέρεται ανάμεσα στο ύψος ενός σημείου από την επιφάνεια της θάλασσας. Εχει δε παρατηρηθεί και απόσυρση των θαλασσινών νερών. Χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση συνέβηκε στην Ιαπωνία, όπου πριν από το μεγάλο σεισμό του 1923 στο Tokyo, δυο νησάκια στον κόλπο Sagami νότια του Tokyo ανυψώθηκαν. Σε χώρες μάλιστα όπως η Ιαπωνία και η Κίνα, υπάρχουν ιστορικές καταγραφές για μεταβολές στη στάθμη λμνών, ποταμών ή και της θάλασσας πριν από ένα μεγάλο σεισμό. Τέλος, μεταβολές μπορούμε, όπως είπαμε, να έχουμε και στις κλίσεις του εδάφους, τις οποίες ελέγχουμε με ειδικά όργανα (κλισιόμετρα).

Το χρονικό διάστημα πριν από ένα σεισμό που αρχίζουν οι οριζόντιες ή κατακόρυφες μεταβολές του εδάφους δεν είναι συγκεκριμένο. Σε μια περιοχή της Ιαπωνίας (Yoshino) η επιμήκυνση του εδάφους άρχισε 10 μήνες πριν από την εκδήλωση ενός σεισμού, ενώ στην ίδια χώρα στην περιοχή Niigata η κατακόρυφη μεταβολή του εδάφους άρχισε να παρατηρείται κοντά 60 χρόνια πριν από την εκδήλωση του σεισμού. Από το 1898 έως και το 1964 κοντά στην τελευταία περιοχή υπήρχε μια διαρκής αλλαγή στην κατακόρυφη απόκλιση. Τελικά, στις 16 Ιουνίου του 1964 η περιοχή χτυπήθηκε από ένα σεισμό μεγέθους 7.5. Κατά την περίοδο μάλιστα 1955 - 59 οι καταγραφές έδειξαν μια γρήγορη αντίστροφη απόκλιση. Ανάμεσα στις διαστάσεις της περιοχής που παρουσιάζει μια ανώμαλη



Δυό παραδείγματα μεταβολής της περιεκτικότητας των υπόγειων νερών στο ραδιενεργό στοιχείο ραδόνιο. Και οι δυό σεισμοί συνέβησαν στη λεκάνη της Τασκένδης.

Σχήμα 50

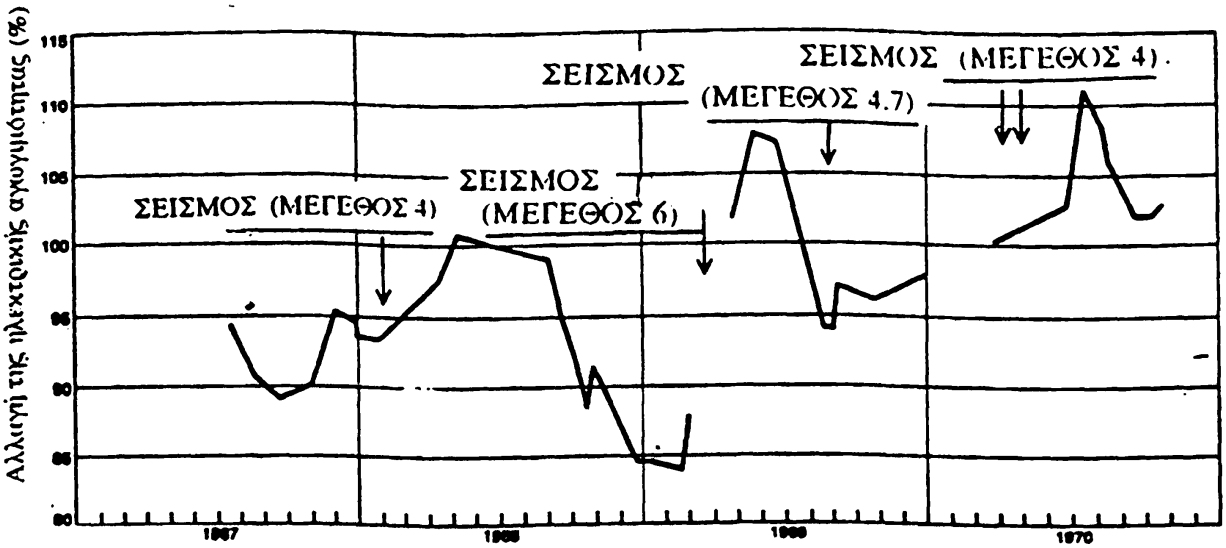
Εκτός από την απευθείας παρακολούθηση της σχετικής αλλαγής της θέσης κάποιων σημείων στην επιφάνεια της Γης, οι τάσεις στο στερεό φλοιό μπορούν να καθοριστούν και με απευθείας μετρήσεις, με ειδικά όργανα. Η μέθοδος αυτή αν και έχει κάποιες επιτυχίες στο ενεργητικό της, εντούτοις αντιμετωπίζει δυο μεγάλα προβλήματα. Το πρώτο είναι η μεγάλη ετήσια μεταβολή της θέσης που οφείλεται σε θερμικές τάσεις. Για την απάλειψη των τάσεων αυτών απαιτείται υπερβολική σταθερότητα των οργάνων μέτρησης. Τα τελευταία χρόνια η σταθερότητα αυτή έχει επιτευχθεί με τη χρήση συμβολομέτρων laser και με τη βοήθεια μιας καινούριας τεχνικής, που στηρίζεται στην ανίχνευση ογκομετρικών αλλαγών. Το δεύτερο και πιο σημαντικό πρόβλημα είναι ο καθορισμός της σχέσης των τάσεων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους με τις διεργασίες που συντελούνται σε βάθη απ' όπου θα ξεκινήσουν οι σεισμοί. Επιφανειακές μετρήσεις κοντά ή και πάνω σε ένα ενεργό ρήγμα μπορούν να αλλοιωθούν από ολίσθηση, κλίση, παραμόρφωση των στρωμάτων που δεν αποτελούν ένα ενιαίο σώμα με τα υλικά που βρίσκονται στην πηγή του σεισμού, και επομένως να οδηγήσουν σε λαθεμένες εκτιμήσεις.

✓ Ένα σημαντικό πρόδρομο φαινόμενο είναι και αυτό που αναφέρεται στη μεταβολή της στάθμης των υπόγειων υδάτων, σε υπόγεια πηγάδια για παράδειγμα. Η μεταβολή αυτή εξηγείται εύκολα από τη θεωρία της διασταλτικότητας, μιας και τα υπόγεια ύδατα εισχωρούν στις ρωγμές οι οποίες ανοίγονται στα πετρώματα που διαστέλλονται. Σε μερικές περιπτώσεις έχει καταγραφεί και μια μεταβολή της θερμοκρασίας των νερών αυτών. Έχει παρατηρηθεί επίσης και μεταβολή στην περιεκτικότητα των νερών στο ραδιενεργό στοιχείο ραδόνιο (Rd). Για παράδειγμα, σημαντική αλλαγή στην περιεκτικότητα σε ραδόνιο παρουσίασαν μεταλλικά νερά της λεκάνης της Τασκένδης, πριν από τον καταστροφικό σεισμό του 1966. Η παραπάνω αλλαγή άρχισε από το 1956, και στα μέσα του 1965 η περιεκτικότητα ήταν περίπου διπλάσια της κανονικής. Από τον Οκτώβρη του 1965 έως και τις 26 Απριλίου του 1966, ημέρα κατά την οποία έγινε ο σεισμός, η περιεκτικότητα είχε σταθεροποιηθεί περίπου. Μετά το σεισμό η περιεκτικότητα έπεσε κατακόρυφα.

Βέβαια θα πρέπει να ξεκαθαρίσουμε ότι το ραδιενεργό στοιχείο ραδόνιο (με χρόνο ημιζωής μόλις 3 1/2 ημέρες) δεν παίζει το ίδιο κανένα ρόλο στην όλη δυναμική των σεισμών. Απλά η αύξηση της περιεκτικότητάς του είναι παραπροϊόν άλλων βασικών δυναμικών δεργασιών στην εστία του σεισμού. Πιο συγκεκριμένα με βάση τη θεωρία της διασταλτικότητας η δημιουργία ρωγμών στα πετρώματα αυξάνει τη ροή του νερού σ' αυτά και επομένως περισσότερο ραδόνιο εισέρχεται στο νερό από τα πετρώματα.

Έχουν επίσης καταγραφεί και μεταβολές στις μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων του εστιακού χώρου κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας ενός φλοιού. Οι ηλεκτρικές μεταβολές αναφέρονται στην αγωγιμότητα των πετρωμάτων. Η αγωγιμότητα των πετρωμάτων του στερεού φλοιού εξαρτιέται κυρίως από το πόσο πορώδη είναι τα πετρώματα, από το πόσα υγρά περιέχουν, και από τις ηλεκτρολυτικές ιδιότητες αυτών των υγρών. Η αντίσταση των πετρωμάτων είναι μικρή όταν αυτά είναι υγρά και αυξάνεται όταν είναι ξηρά. Εφόσον κατά την περίοδο της προετοιμασίας ενός μεγάλου σεισμού αναπτύσσονται μικρορωγμές στα πετρώματα, τότε είναι προφανές ότι θα αλλάζει και η αγωγιμότητά τους. Και η αλλαγή αυτή θα εξαρτιέται από τη δυνατότητα του νερού ή άλλων υγρών να εισχωρήσουν στις ρωγμές που ανοίχτηκαν. Τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μεγαλύτεροι σεισμοί συμβαίνουν όταν η αγωγιμότητα έχει φτάσει στο μέγιστό της, που στην ουσία σημαίνει ότι όλες οι νέες ρωγμές έχουν πληρωθεί με νερό. Η αγωγιμότητα των πετρωμάτων εκτιμιέται από τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο στερεό φλοιό, ανάμεσα σε δυο σημεία που απέχουν αρκετά χιλιόμετρα, και στα οποία δημιουργούμε μια διαφορά δυναμικού. Πριν από ένα μεγάλο σεισμό έχουν παρατηρηθεί μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων του εστιακού χώρου μέχρι και 20%.

Οι μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο της Γης διαπιστώνονται με μαγνητόμετρα που τοποθετούνται στην επιφάνεια της Γης, και τα οποία μπορούν να ανιχνεύσουν ακόμη και πολύ μικρές διακυμάνσεις γύρω από την κανονική τιμή. Για να ανευρεθούν, βέβαια, οι μεταβολές οι οποίες οφείλονται στην



Μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων πριν από την εκδήλωση ενός σεισμού έχουν αναφερθεί σε πολλές περιπτώσεις. Εδώ δείχνουμε τέσσερις τέτοιες περιπτώσεις. Οι μετρήσεις γίνονται με τη διοχέτευση ενός ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος και μετρώνται οι μεταβολές του δυναμικού λίγα χιλιόμετρα μακρύτερα.

Σχήμα 51

παραμόρφωση του εστιακού χώρου, θα πρέπει να αφαιρεθούν όλες οι άλλες που δημιουργούνται από μεταβολές της ροής του ηλιακού ανέμου όπως και από άλλες αιτίες που δεν έχουν σχέση με τον εστιακό χώρο. Οι μεταβολές πάντως που αναφέρνται εδώ είναι της τάξης μερικών γάμα, όπου 1 γάμα = 10^{-4} Gauss. Πριν από ένα σεισμό παρατηρούνται επίσης και μεταβολές της έντασης g του γήινου

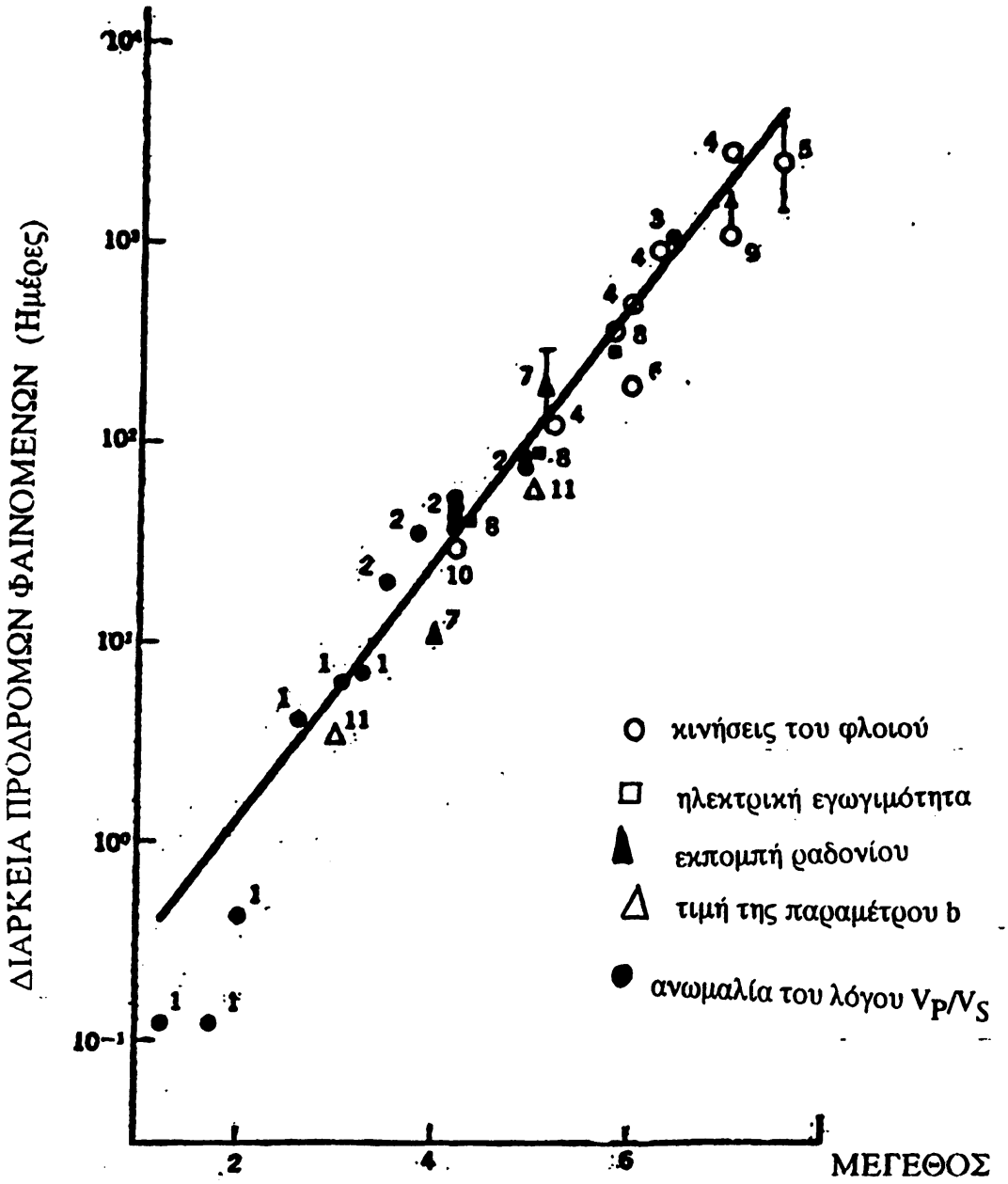
βαρυτικού πεδίου, μέχρι και 10^{-7} g. Οι μεταβολές αυτές φαίνεται ότι είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη διασταλτικότητα του εστιακού χώρου.

Σημαντικά πρόδρομα φαινόμενα είναι και αυτά που αναφέρονται σε μεταβολές της σεισμικής δράσης μιας περιοχής. Οι μεταβολές της σεισμικής δράσης πριν από ένα μεγάλο σεισμό αναφέρονται στα σεισμικά κενά, στη μεταβολή της παραμέτρου b της σχέση (4) και στην εκδήλωση σεισμών βάθους πριν από μεγάλους σεισμούς επιφάνειας. Ως σεισμικά κενά χαρακτηρίζουμε την απουσία σεισμικής δράσης σε μια περιοχή η οποία βρίσκεται σε επικίνδυνη σεισμικά ζώνη και είχε στο παρελθόν χτυπηθεί από σεισμούς. Επειδή ο χρόνος που διαρκεί ένα σεισμικό κενό μπορεί να είναι μεγάλος, αρχικά θεωρούσαν ότι η περιοχή "καθάρισε" από τα σεισμικά φαινόμενα και έγινε ασφαλής. Μετά τη θεωρία, όμως, των λιθοσφαιρικών πλακών αποδείχθηκε ότι συνέβαινε ακριβώς το αντίθετο. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού κενού έχουμε συνεχή συσσώρευση ελαστικής ενέργειας στα πετρώματα, η οποία εφόσον δεν εκλύεται με άλλους μικρούς σεισμιούς είναι αναπόφευκτο να εκλυθεί με ένα μεγάλο σεισμό. Όπως είναι προφανές, βέβαια, η διαπίστωση ενός σεισμικού κενού δεν αποτελεί από μόνη της μια ένδειξη για το χρόνο εκδήλωσης του σεισμού. Γι' αυτό στη συνέχεια θα πρέπει να στηριχθεί κανένας και σ' άλλα στοιχεία. Τέτοια είναι οι στατιστικές μέθοδοι, η γνώση των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων της περιοχής και η ταχύτητα σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών που πρόκειται να δώσουν το σεισμό, και τέλος η παρατήρηση ότι υπάρχει μια ματανάστευση των μεγάλων σεισμών κατά μήκος των σεισμικών ζωνών του πλανήτη.

Σε σχέση με τη μεταβολή της παραμέτρου b το διάγραμμα logN - M αποδεικνύεται ότι πριν από ένα μεγάλο σεισμό αποκτά και αυτό μια "κινητικότητα", αλλάζοντας και την κλίση του (παράμετρος b της σχέσης (4) και την τετμημένη του (παράμετρος a της ίδιας σχέσης). Κανονικά, οι παράμετροι a και b είναι σταθερές για μια καθορισμένη περιοχή και μεταβάλονται μόνο από περιοχή σε περιοχή. Πριν, όμως, από την εκδήλωση ενός μεγάλου σεισμού αποδείχτηκε ότι η παράμετρος b είναι ασυμ ήθιστα μικρή, ακόμη και ανάμεσα

στο --0.35 και 0.5, ενώ σε κανονικές καταστάσεις όπως και στην περίοδο των μετασεισμών έχουμε 1.2 >b >0.8. Στην ουσία, όταν η τιμή της παραμέτρου b μειώνεται, αυτό σημαίνει ότι παρατηρείται ένας ασυνήθιστα μικρός αριθμός σεισμών μικρού μεγέθους ή μικροσεισμών, με μέγεθος 3 ≥ M ≥ 1. Σε πολλές περιπτώσεις η ανίχνευση των σεισμών αυτών, ή και πιο μικρών ακόμη, είναι αρκετά χρήσιμη αλλά ταυτόχρονα και δύσκολη από τα όργανα, μιας και συγχέεται με τον εδαφικό θόρυβο. Αν δηλαδή σε μια περιοχή η στατιστική μέθοδος δικαιολογεί περίπου 10 σεισμούς το χρόνο με μέγεθος περίπου 2, πριν από την εκδήλωση ενός μεγάλου σεισμού ο παραπάνω αριθμός υφίσταται μια σημαντική αύξηση. Αυτό μας δείχνει ότι η προετοιμασία ενός μεγάλου σεισμού χαρακτηρίζεται από αυξημένο αριθμό μικρών συμβάντων. Ο τελευταίος αριθμός πάντως μειώνεται πάλι απότομα λίγο πριν από το κύριο γεγονός, δηλαδή πριν από την εκδήλωση του μεγάλου σεισμού η παράμετρος b αυξάνει και πάλι. Σύμφωνα με τη θεωρία, η τιμή της παραμέτρου b εξαρτιέται άμεσα από την τάση στον εστιακό χώρο, και συγκεκριμένα αύξηση της τάσης μειώνει την απόλυτη τιμή της παραμέτρου αυτής. Κι' αυτό πράγματι συμβαίνει στην πράξη, και δικαιολογεί τον αυξημένο αριθμό των μικροσεισμών πριν από το κύριο γεγονός. Αυξημένη παρουσιάζεται επίσης και η σεισμική δράση βάθους, δηλαδή η ύπαρξη σεισμών με βάθος μεγαλύτερο των 50 με 60 km, πριν από ένα μεγάλο επιφανειακό σεισμό.

Υπάρχει τέλος και η άποψη ότι πριν από ένα μεγάλο σεισμό παρατηρείται μια ασυνήθιστη συμπεριφορά πολλών ζώων. Για παράδειγμα, είναι νευρικά και ανήσυχα, φωνάζουν χωρίς λόγο, δεν δείχνουν να προσέχουν αυτά που συμβαίνουν γύρω τους κ.λ.π. Δυστυχώς, όμως, τα στοιχεία που υπάρχουν γύρω από το θέμα αυτό είναι αντιφατικά και δύσκολο να τα λάβει κανένας σοβαρά υπόψη τους ως στοιχεία πρόγνωσης ενός σεισμού. Τα σκυλιά, για παράδειγμα, υπάρχουν πολλά βράδυα που φωνάζουν και δείχνουν νευρικά, χωρίς αυτό να σχετίζεται με ένα σεισμό. Υπάρχει, όμως, περίπτωση τα ζώα να προαισθάνονται πράγματι έναν επικείμενο σεισμό. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει μάλλον να ερεθίζονται από τις πρόδρομες μικροδονήσεις οι οποίες παρατηρούνται πριν από τους σεισμούς, ή από



Δείχνεται η σχέση ανάμεσα στη διάρκεια των διαφόρων πρόδρομων φαινομένων και στο μέγεθος του σεισμού που ακολούθησε. Οι διάφοροι αριθμοί από το 1 έως και το 11 είναι οι κωδικοί αριθμοί των περιοχών στις οποίες έγινε η αντίστοιχη παρατήρηση.

Σχήμα 52

τα ηχητικά κύματα που παράγουν από διάθλαση στον αέρα τα σεισμικά κύματα, και κυρίως τα επιμήκη που φτάνουν πρώτα. Η συχνότητα των κυμάτων αυτών είναι ανάμεσα στον 1 και στους 20 c/sec και δεν είναι ακουστά από τον άνθρωπο, που ακούει από 60 c/sec και πάνω. Πολλά ζώα αντίθετα μπορούν να συλλάβουν ήχους αυτής της συχνότητας, μιας και κατά κανόνα έχουν καλύτερη και ευρύτερη ακουστικότητα από τον άνθρωπο.

Η βασική παρατήρηση πάντως που πρέπει να κάνουμε πριν τελειώσουμε είναι ότι ίσως κάθε περιοχή έχει τη δική της λεπτομερειακή διαδικασία με την οποία προετοιμάζεί ένα σεισμό. Έτσι, ίσως δεν είναι δυνατό σήμερα να βρεθεί μια και μοναδική μέθοδος που να εφαρμόζεται σε κάθε σεισμικά επικίνδυνη περιοχή. Αντίθετα, φαίνεται ότι χρειάζεται λεπτομερής παρατήρηση της συγκεκριμένης συμπεριφοράς που παρουσιάζει μια περιοχή, και αναγνώριση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της. Είδαμε, άλλωστε, ότι και αυτές οι παράμετροι της απλής σχέσης (2) αλλάζουν από περιοχή σε περιοχή. Αυτό, βέβαια, είναι άμεσα κατανοητό μιας και η σχετική ταχύτητα των λιθοσφαιρικών πλακών αλλάζει από περιοχή σε περιοχή, τόσο ως προς την απόλυτη τιμή όσο και ως προς τα ανυσματικά της χαρακτηριστικά, τα πετρώματα και αυτά διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή κ.λ.π.

Φαίνεται ότι για πολλά χρόνια ακόμη, η αντιμετώπιση ενός σεισμού θα γίνεται με δυο μέτρα, που θα είναι ούτως ή άλλως χρήσιμα, ακόμη κι' αν θα υπάρξει μια μέθοδος σχετικά ακριβούς πρόβλεψης των σεισμών. Τη σωστή αντισεισμική δόμηση των διαφόρων κατασκευών, και την ενημέρωση του κοινού για το ποιες θα πρέπει να είναι οι κινήσεις του κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Και, βέβαια, στη σωστή αντισεισμική προστασία συμπεριλαμβάνεται και η αποφυγή ανέγερσης κτισμάτων στα οποία ένας σεισμός μπορεί να δημιουργήσει πυρκαγιές (π.χ. εργοστάσια υγραερίων κ.λ.π.) ή πυρηνικών αντιδραστήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΟΙ ΠΑΓΕΤΩΝΕΣ

5.1 Οι δυό κβαντικές καταστάσεις

Αν εξαιρέσει κανένας κάποιους ανθρωπογενείς παράγοντες οι οποίοι επιδρούν πάνω στον πλανήτη μας (φαινόμενο θερμοκηπίου, κΑταστροφή όζοντος, κλπ),ο τελευταίος, από θερμοδυναμική άποψη, φαίνεται να βρίσκεται σε μια κατάσταση ισορροπίας. Στην κατάσταση αυτή η μέση θερμοκρασία της γήινης επιφάνειας, για παράδειγμα, παραμένει αμετάβλητη, τουλάχιστον για μικρά χρονικά διαστήματα στη γεωλογική κλίμακα του χρόνου.

Πόσο σταθερή παραμένει όμως η θερμοκρασία αυτή, για μεγάλα διαστήματα της γήινης ιστορίας (δηλαδή κατά τη διάρκεια χιλιάδων ή και εκατομμυρίων χρόνων), και αν μεταβάλλεται προς τα πού μεταβάλλεται; Είδαμε βέβαια στην αρχή ότι η Γη ξεκίνησε τη ζωή της από μια αρκετά ζεστή κατάσταση, η οποία όμως δεν ήταν κατάσταση ισορροπίας μιας και τα περισσότερα αν όχι όλα από τα δυναμικά της συστήματα ήταν σε εξέλιξη. Το παραπάνω λοιπόν ερώτημα αναφέρεται στην κλιματολογική σταθερότητα της Γης από τη στιγμή που στα διάφορα δυναμικά συστήματα που δρουν στον πλανήτη μας επήλθε μια ισορροπία. Πόσο ευσταθής είναι αυτή η ισορροπία; Όπως μαθαίνουμε από τη μελέτη της ιστορίας του πλανήτη μας η παραπάνω ισορροπία πράγματι διαταράσσεται από

καιρό σε καιρό, και μάλιστα πάντοτε προς καταστάσεις χαμηλότερης θερμοκρασίας. Είναι οι καταστάσεις που μας είναι γνωστές με το όνομα **περίοδοι παγετώνων.**

Η εποχή των παγετώνων είναι μια κλιματολογικά ανώμαλη περίοδος της γήινης ιστορίας, που οδηγεί τη Γη έξω από τον κανονικό της ρυθμό. Σ' αυτή, μεγάλες ποσότητες νερού μεταφέρονται κύρια από την ωκεάνεια δεξαμενή στη δεξαμενή των πάγων, με αποτέλεσμα η τελευταία να αυξάνει σημαντικά σε όγκο. Για παράδειγμα, ενώ σήμερα οι παγετώνες καλύπτουν μια έκταση 1.5 εκατομμυρίων km^2, κατά την τελευταία περίοδο των παγετώνων εκτιμιέται ότι κάλυψαν περίπου 45 εκατομμύρια km^2. Δηλαδή μια έκταση 30 φορές μεγαλύτερη από τη σημερινή.

Κατανομή των παγετώνων στο Βόρειο ημισφαίριο, κατά τη διάρκεια της τελευταίας παγετώδους περιόδου

Σχήμα 53

Ας προσπαθήσουμε τώρα να περιγραψουμε μια παγετώδη περίοδο, με βάση κάποιες εργστηριακές παρατηρήσεις αλλά και αρκετές εκτιμήσεις. Από τη στιγμή λοιπόν που θα μπούμε σε μια τέτοια περιοδο η θερμοκρασία της Γης από κάποια εποχή και πέρα αρχίζει να εμφανίζει μια σταδιακή πτώση. Αυτό έχει σα συνέπεια αρχικά μεγάλοι όγκοι πάγου να συγκεντρώνονται στο Βόρειο ημισφαίριο. Στο Νότιο ημισφαίριο η συγκέντρωση του πάγου είναι σχετικά μικρότερη, παρά την πτώση και εκεί της θερμοκρασίας, λόγω του ότι ανάμεσα σε 40 και 70 μοίρες νότιο γεωγραφικό πλάτος δεν υπάρχουν μεγάλες μάζες ξηράς στις οποίες θα συγκεντρωθεί το χιόνι. Αντίθετα, το βόρειο ημισφαίριο διαθέτει το χαρακτηριστικό αυτό. Η συσσώρευση του χιονιού με την πάροδο του χρόνου γίνεται εντυπωσιακά μεγάλη, και στο αποκορύφωμα της παγετώδους περιόδου το πάχος του χιονιού φτάνει τα 3 km. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την έντονη πίεση της γήινης επιφάνειας, η οποία κάτω από τις συνθήκες αυτές υποχωρεί και βυθίζεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η υποχώρηση μπορεί να φτάσει έως και τα 500 m, ενώ η πίεση από τους παγετώνες είναι πάνω από 250 ατμόσφαιρες.

Όταν το ύψος του χιονιού πάντως γίνει πολύ μεγάλο, η πίεση του βάρους του οδηγεί μεγάλες μάζες παγετώνων σε ροή, από τα βόρεια όπου βρίσκονται προς τα νότια. Σιγά-σιγά λοιπόν μεγάλες εκτάσεις της Βόρειας Αμερικής, της Ευρώπης και της Ασίας καλύπτονται από παγετώνες που κύλισαν από τα βόρεια. Και ενώ μεγάλες εκτάσεις της ξηράς παγώνουν, στα παράλια νέες εκτάσεις αποκαλύπτονται από την απόσυρση των θαλάσσιων νερών. Έχει υπολογιστεί ότι η στάθμη των θαλασσών πέφτει γύρω στα 100 έως 150 m.

Η κατάσταση αυτή κρατά αρκετό καιρό, έως ότου από κάποια εποχή και πέρα η θερμοκρασία αρχίζει πάλι να ανεβαίνει. Έχουμε τότε το αντίστροφο φαινόμενο, μιας και τώρα τεράστιες ποσότητες νερού μεταφέρονται από τη δεξαμενή των πάγων στην ωκεάνεια δεξαμενή, οι παγετώνες απομακρύνονται σιγά-σιγά από τις περιοχές που κάλυπταν πριν, και η στάθμη των νερών της θάλασσας επανέρχεται στο κανονικό ύψος. Το κλίμα επανέρχεται επίσης και αυτό στις κανονικές συνθήκες που επικρατούσαν την προπαγετώδη εποχή, και τίποτα

σχεδόν δε θυμίζει την παρένθεση που άνοιξαν οι παγετώνες. Τα πολύ παλιά χρόνια μάλιστα, ανάμεσα σε δυο εποχές παγετώνων, το κλίμα ξαναγινόταν και πάλι το ίδιο πολύ θερμό όπως και πριν. Αυτό επιβεβαιώνεται για παράδειγμα, από απολιθώματα φοινικόδεντρων που βρίσκονται να υπάρχουν ανάμεσα σε δυο παγετώδεις εποχές σε πολύ βόρεια πλάτη, δηλαδή σε περιοχές που σήμερα δεν ευδοκιμούν τα δέντρα αυτά.

Φαίνεται, λοιπόν, σαν το κλίμα της υδρογείου να έχει δυο "κβαντικές" καταστάσεις, μια αυτή που ονομάζουμε κανονική και μια παγωμένη, ανάμεσα στις οποίες μπορει να μεταπηδά. Οι καταστάσεις αυτές είναι σταθερές, και χαρακτηρίζονται από τελείως διαφορετικές φυσικές διεργασίες στο σύστημα των ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Αυτό σημαίνει ότι το φαινόμενο των παγετώνων, και φυσικά και τα αίτια που το προκαλούν, είναι περιοδικό και ότι υπάρχει κάτι που οδηγεί τον πλανήτη μας από τη μια κατάσταση στην άλλη. Αυτό είναι σημαντικό στην αναζήτηση των παραγόντων εκείνων που προκαλούν αυτό το κβαντικό πήδημα, γιατί μπορεί εύκολα κανένας να αποκλείσει μια σειρά από παράγοντες που η μεταβολή τους μπορεί μεν να παγώσει τη Γη, αλλά δεν της επιτρέπει να ξεφύγει από το λευκό θάνατο. Οι τελευταίοι ρίχνουν δηλαδή τον πλανήτη μας σε μια παγωμένη παγίδα, από την οποία δεν μπορεί να απελευθερωθεί ώστε να επανέλθει και πάλι στην αρχική κανονική του κατάσταση. Με άλλα λόγια θα πρέπει να δούμε τη μεταπήδηση της Γης από την κανονική κατάσταση στην παγετώδη όπως ακριβώς και τη μεταπήδηση του ηλεκτρονίου ενός ατόμου από μια ηλεκτρονική στοιβάδα σε μια άλλη, όταν χτυπηθεί από ένα φωτόνιο κατάλληλης ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρόνιο μπορεί πάντα να επανέλθει στην αρχική στοιβάδα εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Στην αντίθετη περίπτωση, εάν η ενέργεια του φωτόνιου είναι πάνω από κάποιο όριο, το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει για πάντα το άτομο αφήνοντάς το ιονισμένο.

Πόσο χρόνο απαιτεί συνολικά η παγετώδης περίοδος για να ολοκληρώσει τον κύκλο της; Έχει υπολογιστεί ότι από τη στιγμή που η Γη μπαίνει σε περίοδο παγετώνων αρχίζει μια σταδιακή μείωση της μέσης θερμοκρασίας της που κρατά

μερικές χιλιάδες χρόνια. Στο μέγιστο της παγετώδους περιόδου η μέση θερμοκρασία πέφτει κατά 2° με 3° C. Στους πόλους, όμως, η πτώση της θερμοκρασίας είναι πιο μεγάλη, και φτάνει μέχρι και τους 10° C. Από το σημείο αυτό και πέρα ακολουθεί μια σταδιακή άνοδος της θερμοκρασίας, ώστε μετά την πάροδο μερικών χιλιάδων χρόνων να επανέλθει και πάλι στα κανονικά επίπεδα. Για την τελευταία περίοδο παγετώνων, που οι εκτιμήσεις μας είναι σχετικά πιο σίγουρες, ξέρουμε ότι άρχισε περίπου 18.000 πριν από σήμερα. Είχε ένα μέγιστο γύρω στα 15.000 χρόνια προν, 11.000 χρόνια πριν άρχισε η σταδιακή απόσυρση των παγετώνων και η επάνοδος στις κανονικές συνθήκες έγινε μόλις πριν από 6.000 χρόνια. Πριν από τόσα χρόνια μάλιστα υπολογίζεται ότι σταθεροποιήθηκε το ύψος των θαλάσσιων νερών. Αν και θα πρέπει να σημειώσουμε ότι υπάρχουν ενδείξεις ότι ο στερεός φλοιός στις Σκανδιναυικές χώρες δεν έχει ακόμη επανέλθει στην κατάσταση που ήταν πριν δεχτεί την πίεση των παγετώνων, και ότι βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της επανόδου. Φαίνεται να επανέρχεται, μάλιστα, με μια ταχύτητα ίση με 1 cm ανά έτος.

5.2 Η ιστορία τους

Όπως καθετί που συμβαίνει πάνω στη Γη, έτσι και μια περίοδος παγετώνων αφήνει κάποια χαρακτηριστικά χνάρια. Για παράδειγμα, αφήνει κάποια χαρακτηριστικά πετρώματα (μορένες, τιλλίτες κ.λ.π.), όπως και απολιθώματα ζώων που γνωρίζουμε ότι μπορούσαν να ζήσουν μόνο σε ψυχρό κλίμα. Στους τελευταίους μάλιστα παγετώνες φαίνονται σαφέστατα και άλλα κατάλοιπά τους, μιας και δεν έχει δράσει ακόμη πάνω σ' αυτά η διάβρωση. Οι παγετώνες άφησαν λοιπόν απ' όπου πέρασαν κοιλάδες σε σχήμα σκάφης. Έτσι π.χ. τα Νορβηγικά φιόρδ είναι παλιές κοιλάδες παγετώνων οι οποίοι κατέβηκαν από τα βουνά προς τα κάτω. Επίσης οι λίμνες της Ελβετίας και της Φινλανδίας σχηματίστηκαν αρχικά από παγετώνες όπως και η λίμνη Garda στις Ιταλικές Άλπεις. Καθώς οι

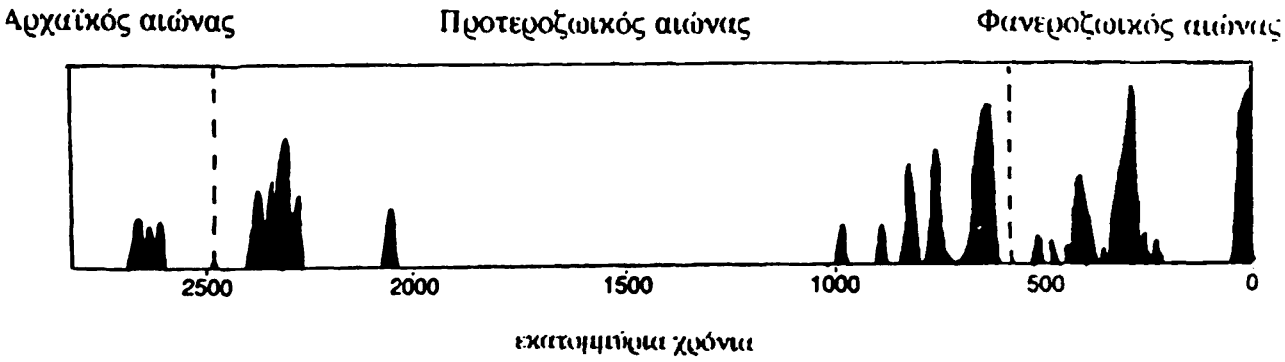
παγετώνες κινήθηκαν άφησαν παραπέρα λειασμένα τα πετρώματα και με χαρακτηριστικές ραβδώσεις.

Η υπόθεση ότι η Γη πέρασε παγετώδεις περιόδους καθιερώθηκε σαν μια σοβαρή επιστημονική άποψη από τα μέσα στου 19ου αιώνα, με τη δουλειά του Louis Agassiz. Η κρίσιμη παρατήρηση που καθιέρωσε την υπόθεση αυτή ήταν ότι μεγάλα σε μέγεθος βράχια βρίσκονταν σε μέρη στα οποία δεν δικαιολογούνταν η παρουσία τους, μακριά από τα πετρώματα στα οποία δημιουργήθηκαν και ανήκαν. Γι' αυτό και τους έδωσαν το όνομα "πλανόδια βράχια". Μια άλλη παρατήρηση αφορούσε στους σωρούς από ανακατωμένα μικρά βράχια, που βρίσκονταν σε διάφορα σημεία της Ευρώπης. Ο πρώτος που προσπάθησε να εξηγήσει και τα δυο σαν ένδειξη μεγάλων παγετώνων που κουβάλησαν μακριά τα μεγάλα βράχια ή ανακάτεψαν και έκαναν σωρούς άλλα μικρότερα βράχια, ήταν το 1834 ο Ελβετός Johann Von Charpentier, μηχανικός ορυχείων. Στην αρχή, ο L. Agassiz, μη πιστεύοντας τίποτα απ' όσα έλεγε ο Charpentier, βάλθηκε με μεγάλο ζήλο να αποδείξει ότι η όλη θεωρία για εκτεταμένους παγετώνες έπρεπε να απορριφθεί. Κάνοντας, όμως, προσεκτικές και σωστές παρατηρήσεις έβλεπε μέρα με τη μέρα ότι οι παραπάνω αλλά και άλλες παρατηρήσεις ταίριαζαν πάρα πολύ καλά στη θεωρία του Charpentier. Έγινε έτσι από αρνητής της θεωρίας αυτής θερμός υποστηρικτής της. Μάλιστα, κατάφερε να δώσει μια πολύ ολοκληρωμένη εικόνα των απόψεών του. Θα παραθέσουμε εδώ ένα μικρό απόσπασμα από τη δουλειά του Agassiz.

" Η ανάπτυξη των τεράστιων αυτών παγετώνων θα πρέπει να κατέστρεψε όλη την οργανική ζωή στην επιφάνεια του πλανήτη μας. Το έδαφος της Ευρώπης, που πριν καλύπτονταν από τροπική βλάστηση και στο οποίο πλανιόντουσαν κοπάδια από γιγαντιαίους ελέφαντες, τεράστιους ιπποπόταμους και γιγαντιαία σαρκοφάγα, ξαφνικά θάφτηκε κάτω από ένα στρώμα πάγου. Το στρώμα αυτό κάλυψε πεδιάδες, λίμνες, θάλασσες και οροπέδια. Ακολούθησε η σιωπή του θανάτου . . . οι πηγές στέρεψαν, τα ρυάκια σταμάτησαν να τρέχουν και οι ηλιαχτίδες που έφταναν πάνω από την παγωμένη ακτή συναντούσαν μόνο το

σφύριγμα των βόρειων ανέμων και τον υπόκωφο θόρυβο των ρωγμών που άνοιγαν στην επιφάνεια του τεράστιου ωκεανού των πάγων".

Η Γη έχει παγώσει πολλές φορές στην ιστορία της. Οι πρώτοι παγετώνες πρέπει να εμφανίστηκαν περίπου 2.5 με 2 δισεκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα. Στη συνέχεια παρατηρείται μια ηρεμία περίπου 1 δισεκατομμυρίου χρόνων, μετά από την οποία κάνουν και πάλι την εμφάνισή τους. Για τους πρώτους αυτούς παγετώνες ξέρουμε πολύ λίγα πράγματα, και είναι πολύ δύσκολο να εκτιμήσουμε αν τα αίτια που τους γέννησαν ήταν αστρονομικά ή τεκτονικά. Γιατί δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι η τεκτονική δραστηριότητα του πλανήτη μας ήταν πολύ έντονη τα χρόνια που έκανε τα πρώτα του βήματα. Ίσως, επίσης, να είχαν σχέση με αυξομειώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.



Οι πιό σημαντικές παγετώδεις περίοδοι του πλανήτη μας, κατά τις οποίες αυτός γινόταν ένας κρύος, υγρός και αρκετά αφιλόξενος κόσμος για τους κατοίκους του. Το ύψος κάθε κορυφής είναι ανάλογο με την εκτίμησή μας για τον όγκο των παγετώνων.

Σχήμα 54

Οι μεγαλύτερες και πιο σκληρές ίσως περίοδοι παγετώνων σημειώθηκαν κατά το Προκάβριο, και συγκεκριμένα πριν από 600 έως 700 εκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα. Οι παγετώνες που σχηματίστηκαν τότε έφτασαν ακόμη και σε περιοχές που βρίσκονταν στην τροπική ζώνη. Τα σημάδια των παγετώνων αυτών υπάρχουν σήμερα κρυμμένα σε πετρώματα που τώρα βρίσκονται σε τροπικές ερήμους, όπως στη Σαχάρα, αλλά και σε μέρη που είναι συνηθισμένα σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως η Γροιλανδία και το νησί Spitsbergen.

Πετρώματα της Προκαμβριανής εποχής, με ηλικία μεγαλύτερη από 570 εκατομμύρια χρόνια, στην Κίνα, τη Νορβηγία, την Αυστραλία και την Αφρική, δείχνουν ίχνη από πολλές διαφορετικές μεταξύ τους παγετώδεις περιόδους. Η τελευταία Προτεροζωϊκή περίοδος που κράτησε ανάμεσα στα 950 έως 570 εκατομμύρια χρόνια πριν, φαίνεται ότι ήταν αυτή που κάλυψε περισσότερες περιοχές του πλανήτη μας. Όλες οι γνωστές σήμερα ήπειροι επηρεάστηκαν σημαντικά από τους παγετώνες εκείνων των μακρινών εποχών. Από τα ευρήματα, μάλιστα, και τα ίχνη που άφησαν οι παγετώνες φαίνεται ότι επηρέασαν περισσότερο τα μικρά πλάτη και λιγότερο τα μεγάλα. Ήταν, δηλαδή, Ισημερινοί και όχι Πολικοί παγετώνες. Ίσως αυτό να μας δείχνει ότι οι κλιματολογικές ζώνες των πρώτων χρόνων της ιστορίας του πλανήτη μας ήταν τελείως διαφορετικές από τις σημερινές. Ίσως, επίσης, ο άξονας της Γης είχε τα ίδια αυτά χρόνια μεγαλύτερη κλίση απ' ότι σήμερα, οπότε οι τροπικές ζώνες έπαιρναν λιγότερη ηλιακή ενέργια απ' ότι οι πολικές. Η Παλαιογεωγραφία, όμως, έχει πολύ λίγα να μας 'πεί για όλα αυτά.

Μεγάλοι όγκοι παγετώνων εμφανίστηκαν επίσης προς το τέλος του Φανεροζωϊκού αιώνα, ο οποίος τελείωσε πριν από 65 εκατομμύρια χρόνια. Στην περίοδο αυτή έχουν καταγραφεί τουλάχιστον τέσσερις μεγάλες παγετώδεις περίοδοι ανάμεσα στα 600 και 850 εκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα. Νωρίτερα, υπάρχουν ενδείξεις ότι η Γη πάγωσε τουλάχιστον δυο φορές κατά τη διάρκεια του Προκαμβριανού αιώνα, ο οποίος τέλειωσε πριν από 570 εκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα. Πάγωσε επίσης δυο τουλάχιστον φορές κατά τον

Παλαιοζωϊκό αιώνα (750 έως 220 εκατομμύρια χρόνια πριν), μια στην αρχή και μια στο τέλος, και κάμποσες φορές κατά την Πλειστόκενο, η οποία άρχισε 1.8 εκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα, και τέλειωσε πριν 10.000 χρόνια.

5.3 Η ερμηνεία τους

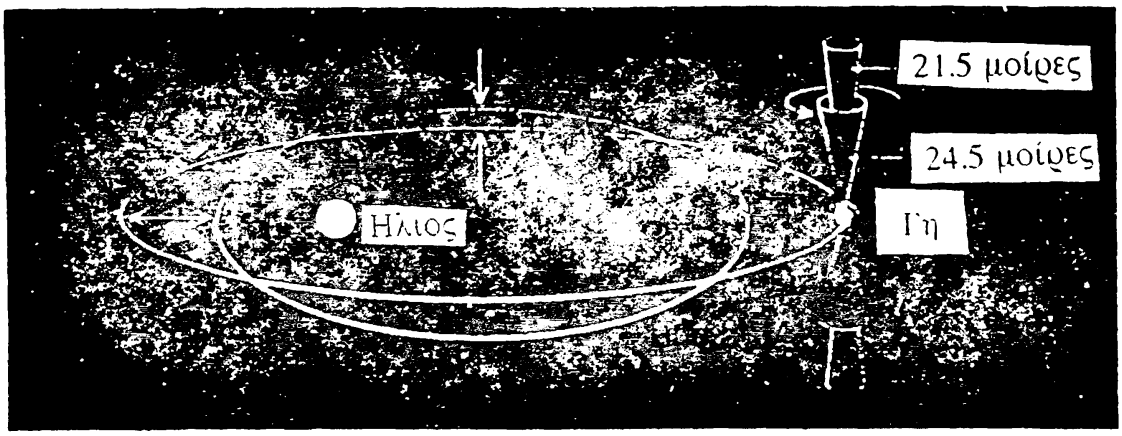
Γιατί, όμως, η Γη παγώνει; Υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος μηχανισμός που την οδηγεί σε καταστάσεις χαμηλότερης επιφανειακής θερμοκρασίας και ποιος είναι αυτός; Σημαντική βοήθεια για να απαντηθούν τα ερωτήματα αυτά έπαιξε η εξής ανακάλυψη των γεωεπιστημόνων. Καθώς ο αέρας μετακινείται από τον Ισημερινό προς το Βορρά κα το Νότο κουβαλά σημαντικές ποσότητες υδρατμών. Από τα μόρια των υδρατμών άλλα σχηματίζονται από το ισότοπο του οξυγόνου Ο-18 και άλλα από το ισότοπο Ο-16. Καθώς οι υδρατμοί υγροποιούνται και πέφτουν υπό μορφή βροχής, τα μόρια με το Ο-18 πέφτουν πιο γρήγορα, ενώ τα μόρια με το Ο-16 πέφτουν σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη σα χιόνι.

Είναι φυσικό τώρα ότι όσο πιο ψυχρή είναι μια αέρια μάζα που κινείται από τον Ισημερινό προς τους Πόλους, τόσο πιο πιθανό είναι να ρίξει καθ' όδον με βροχή το περιεχόμενό της σε υδρατμούς και σε νερό. Έτσι, σε περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών πέφτει περισσότερο Ο-18 στους ωκεανούς και λιγότερο στους πόλους, δηλαδή όταν στην ξηρά συσσωρεύεται χιόνι οι ωκεανοί εμπλουτίζονται κατά τι περισσότερο με Ο-18. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να έχουμε κάποιες πληροφορίες για την ποσότητα του χιονιού που υπάρχει στη Γη, εξετάζοντας το λόγο των δυο ισοτόπων του οξυγόνου σε ιζήματα των ωκεανών. Τέτοιες μετρήσεις έχουν γίνει για ιζήματα των τελευταίων 800.000 χρόνων και δείχνουν ότι η ποσότητα του χιονιού στη Γη αυξομειώνεται με περιόδους 20.000, 40.000 και 100.000 χρόνων. Η περίοδος των 100.000 χρόνων μάλιστα είναι το κυρίαρχο γνώρισμα των μετρήσεων αυτών μιας και υπάρχει μια σταθερή μεγάλη αύξηση του

όγκου του χιονιού κάθε τόσα χρόνια, που ακολουθείται από μια απότομη μείωση. Άρα λοιπόν υπάρχει μια σαφέστατη περιοδικότητα στο φαινόμενο.

Μήπως αυτή η συγκεκριμένη περιοδικότητα μπορεί να μας οδηγήσει και στο μηχανισμό που παράγει το φαινόμενο; Να σημειώσουμε ότι κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί, όπως οι ηπειρωτικές κινήσεις που με τη σειρά τους επηρεάζουν την κυκλοφορία των ωκεάνειων ρευμάτων, μια αλλαγή της χημικής σύστασης της ατμόσφαιρας κυρίως με την μεταβολή του διοξειδίου του άνθρακα, κ.λ.π. Όλοι όμως οι μηχανισμοί αυτοί δεν μπορούν να δώσουν μιαν επαρκή δικαιολογία για την περιοδικότητα του φαινομένου. Προς την κατεύθυνση αυτή, η πιο σημαντική θεωρία που έχει διατυπωθεί είναι αυτή του Γιουγκοσλάβου Milankovic. Η θεωρία αυτή υποστηρίζει ότι ο μηχανισμός που δημιουργεί τις σημαντικές κλιματολογικές αλλαγές στον πλανήτη μας έχει σχέση όχι με το ολικό ποσό της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη Γη, το οποίο ούτως ή άλλως ξέρουμε ότι αλλάζει πολύ λίγο, αλλά με τη μεταβολή του ποσού της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει κατά το καλοκαίρι στο Βόρειο ημισφαίριο. Η μεταβολή αυτή ρυθμίζεται από τρεις παράμετρες της γήινης τροχιάς γύρω από τον Ηλιο. Η πρώτη παράμετρος είναι η γωνία ανάμεσα στον άξονα της Γης και το επίπεδο της γήινης τροχιάς (επίπεδο της εκλειπτικής). Η γωνία αυτή καθορίζει σε ποιο βαθμό ο Βόρειος Πόλος δείχνει προς τον Ηλιο, όταν το βόρειο ημισφαίριο έχει καλοκαίρι, και έχει μια περίοδο μεταβολής 40.000 χρόνων ανάμεσα στις τιμές 21.5^{o} και 24.5^{o}. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της γωνίας αυτής τόσο πιο έντονες είναι οι συνθήκες και στα δυο ημισφαίρια, δηλαδή τόσο τα καλοκαίρια είναι πιο ζεστά και οι χειμώνες πιο κρύοι. Η δεύτερη παράμετρος είναι η διεύθυνση προς την οποία δείχνει ο άξονας της Γης. Αυτό καθορίζει κατά πόσο το περιήλιο πέφτει στο καλοκαίρι του βόρειου ή του νότιου ημισφαίριου. Η παράμετρος αυτή έχει μια περίοδο μεταβολής 20.000 χρόνων. Η τρίτη και τελευταία παράμετρος είναι η εκκεντρότητα της γήινης τροχιάς, η οποία έχει μια περίοδο μεταβολής 100.000. Η παράμετρος αυτή επηρεάζει το ποσό της ακτινοβολίας που δέχεται η Γη όταν βρίσκεται στο περιήλιο. Όταν η τροχιά γίνεται πιο ελλειπτική, τότε μεγαλώνει και

η διαφορά απήλιου-περιήλιου κάνοντας πιο έντονες τις εποχές στο ένα ημισφαίριο και πιο απαλές στο άλλο. Σήμερα η Γη φτάνει στο απήλιο κατά τη διάρκεια που το νότιο ημισφαίριο έχει χειμώνα. Αυτό έχει σα συνέπεια οι χειμώνες στο ημισφαίριο αυτό να είναι λίγο πιο κρύοι και τα καλοκαίρια λίγο πιο ζεστά, απ' ότι στο βόρειο ημισφαίριο.



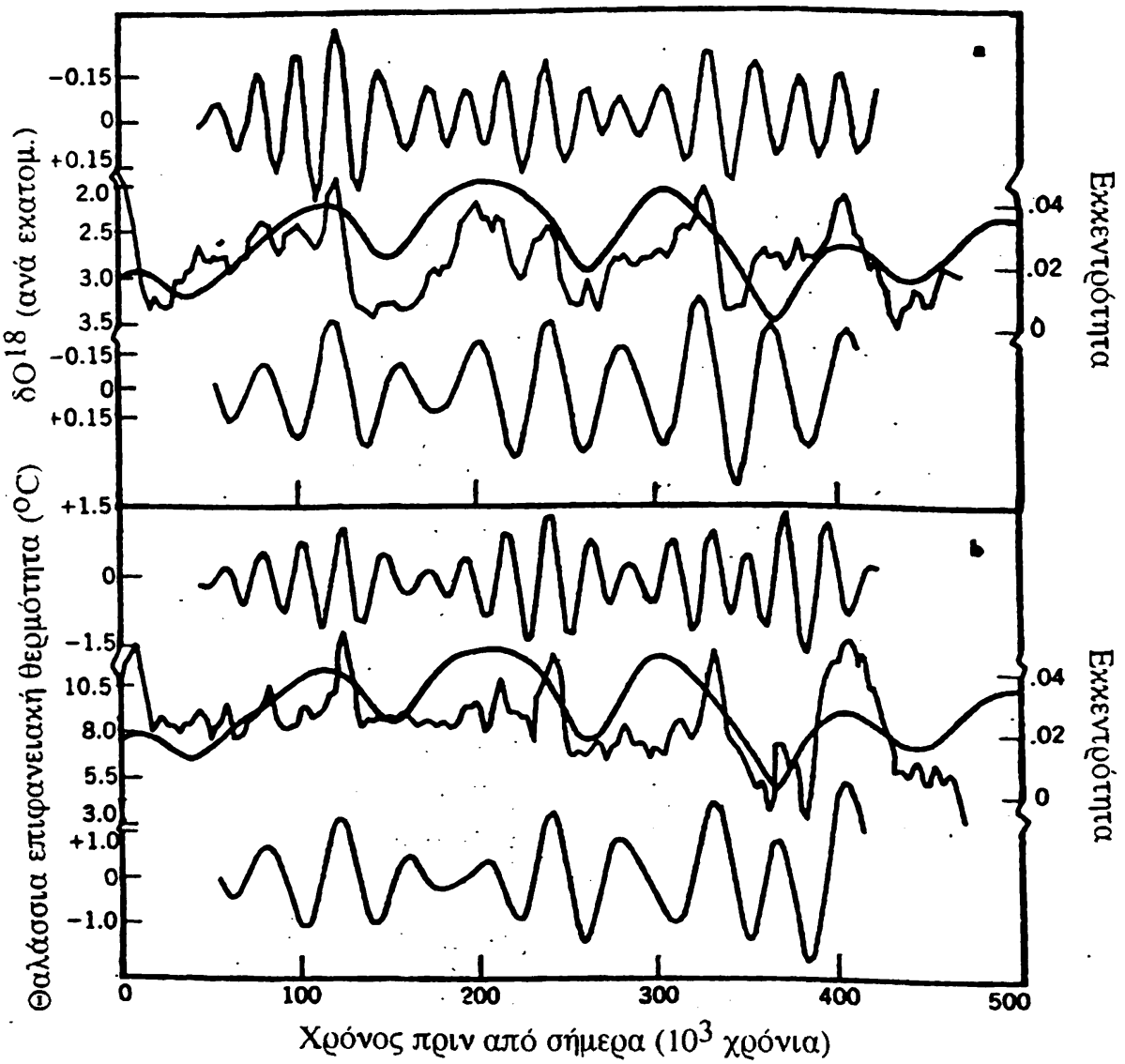
Τα τρία αστρονομικά μεγέθη που φαίνεται να παίζουν σημαντικό ρόλο στην εμφάμιση των παγετώνων είναι: α) η εκκεντρότητα της γήινης τροχιάς, η οποία μας δείχνει πόσο η τροχιά απομακρύνεται από τον κύκλο, β) ο προσανατολισμός του άξονα περιστροφής της, ο οποίος διαγράφει έναν κώνο στο χώρο, και γ) η κλόνιση του άξονα αυτού, η οποία επηρεάζει το άνοιγμα του κώνου.

Σχήμα 55

Σύμφωνα με τον Milankovic όλοι αυτοί οι παράγοντες μαζί μπορούν να μεταβάλουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει σε μεγάλα πλάτη κατά το καλοκαίρι στο βόρειο ημισφαίριο μέχρι και 20%. Αυτό έχει ως συνέπεια η Γη να παγώνει Ο Milankovic δούλευε τη θεωρία του επί δεκαοχτώ χρόνια, από το 1920 έως το 1938, και έλαβε υπόψη του τα τελευταία 600.000 χρόνια της γήινης ιστορίας. Αξίζει δε να σημειώσουμε ότι τα χρόνια εκείνα, χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικών υπλογιστών που βοηθάνε εντυπωσιακά στην ανάλυση των δεδομένων και δίνουν πολλές διεξόδους και ερμηνείες σε στοιχεία που κατ' αρχή φαίνονται ασυσχέτιστα μεταξύ τους, ήταν υποχρεωμένος να κάνει όλους τους υπολογισμούς με το χέρι και να καθοδηγείται πολλές φορές από τη διαίσθησή του.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η θεωρία του Milankovic θεωρεί ότι υπάρχουν τρεις αστρονομικές παράμετροι που μεταβάλλουν περιοδικά την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, η οποία κατανέμει σ' όλη τη Γη την ηλιακή ενέργεια που δέχεται αυτή, τη μέση θερμοκρασία της Γης κ.λ.π. Είναι δε σημαντικό ότι η περιοδικότητα των παραμέτρων αυτών ταυτίζεται, όπως είδαμε, με την περιοδικότητα του λόγου των ισοτόπων του οξυγόνου -18 και -16, από τον οποίο συνάγεται η περιοδικότητα των εποχών των παγετώνων.

Υπάρχουν όμως ακόμη αρκετά ερωτηματικά που μένουν αναπάντητα, για να πούμε ότι έχουμε μια πλήρη εικόνα των όσων συμβαίνουν σε μια παγετώδη περίοδο. Κυρίως μας λείπουν εκείνα τα στοιχεία που αναφέρονται στις ακριβείς χημικές μεταβολές που συντελούνται στην ατμόσφαιρα και στους ωκεανούς, που είναι οι δυο σημαντικοί παράγοντες κατανομής της ηλιακής ενέργειας στον πλανήτη μας. Υπάρχουν για παράδειγμα ενδείξεις ότι το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μειώθηκε κατά την τελευταία παγετώδη περίοδο στα 2/3 της τιμής που έχει σε μια κανονική περίοδο. Άμεση συνέπεια και η μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Είμαστε όμως ακόμη πολύ μακριά από την πλήρη κατανόηση της μεταβολής αυτής. Κατά πόσο δηλαδή η μείωση ακολούθησε ή προηγήθηκε των παγετώνων.



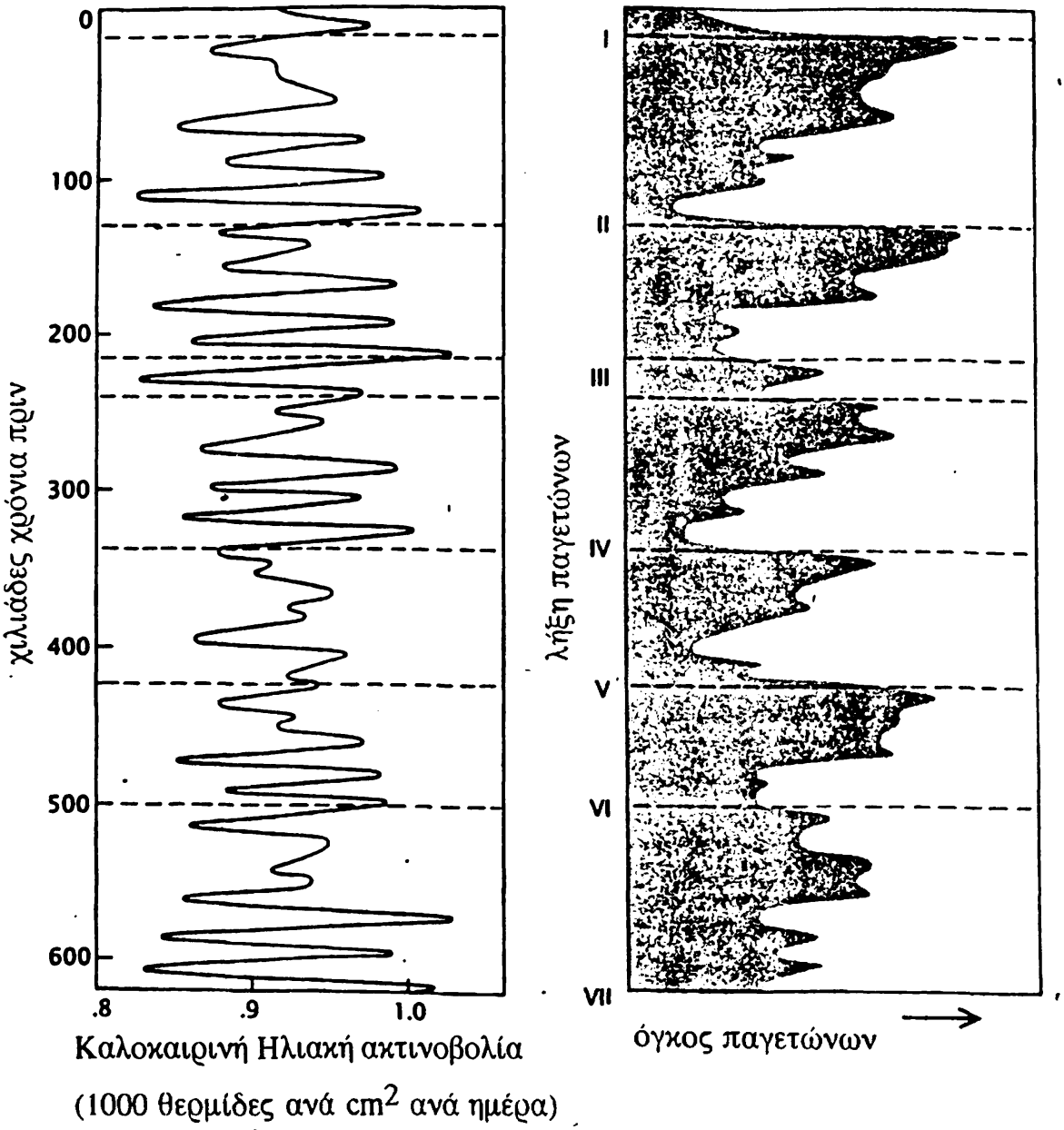
Μεταβολές στην εκκεντρότητα της γήινης τροχιάς και της θερμοκρασίας του πλανήτη μας τα τελευταία 500,000 χρόνια. Η μία κεντρική καμπύλη του επάνω σχήματος δείχνει τις μεταβολές δO18

του οξυγόνου-18 και η άλλη την μεταβολή της εκκεντρότητας. Στο ίδιο σχήμα η επάνω και η κάτω καμπύλη είναι οι συνιστώσες της μεταβολής δO^{18} με περιόδους 23,000 και 40,000 χρόνια αντίστοιχα.

Στο κάτω σχήμα η μία κεντρική καμπύλη δείχνει και πάλι την μεταβολή της εκκεντρότητας και η άλλη την μεταβολή της θερμοκρασίας T_S της επιφάνειας της θάλασσας, από διάφορες πηγές. Και η δεύτερη αυτή καμπύλη έχει δύο συνιστώσες με περιόδους 23,000 χρόνια (επάνω) και 40,000 χρόνια (κάτω). Οπως έχουμε 'πει το Ο-18 είναι ένα παλαιοθερμόμετρο.

Σχήμα 56

Τα τελευταία χρόνια, η θεωρία του Milankovic επιβεβαιώθηκε από πολλές επιστημονικές έρευνες. Έτσι, τη δεκαετία του '70 μια ερευνητική ομάδα μελέτησε δυο δείγματα από το νότιο ημισφαίριο, που τα πήραν από το βυθό του νότιου Ινδικού ωκεανού. Τα σημεία από τα οποία πήραν τα δείγματα απείχαν ίσες αποστάσεις από την Αφρική, την Αυστραλία και την Ανταρκτική, έτσι που να μηδενίσουν αποιαδήποτε διαφοροποίηση θα μπορούσε να υπάρξει από υλικά διάβρωσης των ηπείρων αυτών. Κάθε 1000 χρόνια το ύψος των ιζημάτων που αποτίθενται εκτιμήθηκε ότι ήταν 3cm. Οι ερευνητές που αναφέραμε εκτέλεσαν τριών ειδών πειράματα. Από το πλήθος κάποιων μικροοργανισμών που φέρουν το όνομα "radiolaria", οι ερευνητές μπόρεσαν να εκτιμήσουν τις καλοκαιρινές θερμοκρασίες της θάλασσας. Επίσης μετρήθηκε ο λόγος των ισοτόπων του οξυγόνου 18 και 16, στα απολιθωμένα κελύφη του ζωικού πλακτόν των foraminafera. Ο λόγος αυτός, όπως έχουμε 'πεί, σχετίζεται με τον όγκο των παγετώνων στη Γη. Τέλος, μέτρησαν το σχετικό πληθυσμό ενός είδους που φέρνει το όνομα Cycladophora davisiana, ο οποίος θεωρείται ότι αντανακλά την αλλαγή της θερμοκρασίας και την αλμυρότητα του Ανταρκτικού ωκεανού. Κάνοντας μια φασματική ανάλυση στις καμπύλες που προέκυψαν, βρέθηκαν τρεις ευδιάκριτες



Στο αριστερό σχήμα δείχνεται η θεωρητική μεταβολή της ηλιακής ενέργειας κατά το καλοκαίρι σε υψηλα βόρεια πλάτη, σαν αποτέλεσμα των μεταβολών που υφίσταται η γήινη τροχιά. Στο δεξιό σχήμα δείχνεται η αντίστοιχη μεταβολή του όγκου των παγετώνων, όπως προκύπτει από αναλύσεις ωκεάνειων ιζημάτων. Η μεταβολή αυτή έχει μιά ξεκάθαρη περίοδο 100,000 χρόνων, η οποία συμπίπτει με την περίοδο μεταβολής της εκκεντρότητας της γήινης τροχιάς.

Σχήμα 57

φασματικές κορυφές με περιόδους 23.000, 42.000 και 100.000 χρόνων. Σύμφωνα με τα συμπεράσματά τους, οι παραπάνω κορυφές είναι υπεύθυνες για αλλαγές του γήινου κλίματος κατά 10%, 25% και 50% αντίστοιχα, επιβεβαιώνοντας έτσι τη θεωρία του Milankovic.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι σήμερα, πολύ λίγες παρατηρήσεις αφήνουν κάποιες αμφιβολίες για την ορθότητα της θεωρίας του Milankovic. Οι περισσότερες από αυτές αντίθετα, επιβεβαιώνουν την ορθότητά της. Σαν ένα άλλο παράδειγμα να αναφέρουμε ότι, τη δεκαετία 1967-77 μια ομάδα ερευνητών μελέτησε κοραλλιογενείς περιοχές στα νησιά Barbados, οι οποίες αυξάνουν συνεχώς, και κατέληξε και αυτή σε θετικά συμπεράσματα γα την ορθότητα της παραπάνω θεωρίας, κυρίως σε ότι αφορά την περίοδο των παγετώνων. Όλες, πάντως, οι ενδείξεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι απ' όλους του αστρονομικούς παράγοντες αυτός που ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση στην εμφάνιση των παγετώνων είναι η μεταβολή της εκκεντρότητας της γήινης τροχιάς.

Εάν η θεωρία του Milankovic είναι σωστή και εάν κανένας αγνοήσει τις επιδράσεις που μπορούν να επιφέρουν στο κλίμα οι ανθρώπινες δραστηριότητες στις επόμενες χιλιετίες, τότε σήμερα πηγαίνουμε προς μια κατάσταση στην οποία θα έχουμε εμφάνιση μεγάλων παγετώνων στο βόρειο ημισφαίριο σε μερικές χιλιάδες χρόνια.

Γραφικές Τέχνες - Εκτυπώσεις Offset
ΘΕΟΔΩΡΙΔΗ
Βαλαωρίτου 25
454 44 Ιωάννινα
Τηλ. 77 3 58