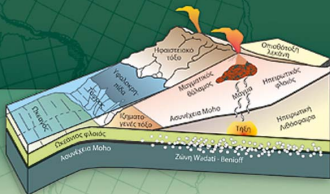


Κωνσταντίνος Παπαζάχος

Βασίλειος Παπαζάχος

Εισαγωγή στη Γεωφυσική



Πρόλογος

Το προηγούμενο βιβλίο Γεωφυσικής, που διδάχθηκε σε φοιτητές του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και άλλων Πανεπιστημίων της Ελλάδας, είχε δημοσιευθεί το 1991 από τον δεύτερο συγγραφέα του παρόντος βιβλίου. Όμως, από τότε έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος πάνω σχεδόν σε όλα τα γνωστικά αντικείμενα της Γεωφυσικής. Νέες πληροφορίες έχουν εμπλουτίσει την υπάρχουσα γεωφυσική γνώση κατά την τελευταία εικοσαετία σε θέματα δομής, σύστασης και φυσικών μεταβολών του εσωτερικού της Γης, που αποτελούν τα βασικά θέματα τα οποία πραγματεύεται το παρόν σύγγραμμα. Η ανάπτυξη αυτή αφορά όχι μόνο τον εμπλουτισμό της γνώσης σε σχέση με κλασσικά γεωφυσικά αντικείμενα αλλά και την παραγωγή γνώσης σε νέα γεωφυσικά θέματα. Για παράδειγμα, η κλασσική γεωφυσική αντίληψη για τα γεωδυναμικά φαινόμενα που παρατηρούνται στην επιφάνεια της Γης (σεισμικότητα, ηφαιστειότητα, μετάθεση ηπείρων, κλπ) ήταν ότι αυτά οφείλονται σε αίτια που βρίσκονται κυρίως στο σύστημα λιθόσφαιρας - ασθενόσφαιρας, μέχρι και τον πάνω μανδύα (περίπου μέχρι το βάθος των 700 km), ενώ σήμερα είναι γνωστό ότι τέτοια αίτια βρίσκονται μέχρι το όριο μανδύα – πυρήνα (βάθος περίπου 2900 km). Διαπιστώθηκε μάλιστα ότι στα αίτια αυτά, που έχουν την πηγή τους σε τόσο μεγάλα βάθη μέσα στη Γη, οφείλεται η διάσπαση των λιθοσφαιρικών πλακών και η μετάθεση των σημερινών ηπείρων. Υπήρξε, συνεπώς, ανάγκη συγγραφής ενός νέου βιβλίου, το οποίο να βασίζεται στο παλαιότερο βιβλίο, αλλά να περιλαμβάνει τις βασικές αρχές της σύγχρονης γεωφυσικής γνώσης που είναι δημοσιευμένη σε πρόσφατες εκδόσεις (διεθνή περιοδικά, πρακτικά συνεδρίων, διαδίκτυο, κλπ).

Πέραν από την παραπάνω αναγκαιότητα επικαιροποίησης του βιβλίου, κατά την προηγούμενη εικοσαετία το περιεχόμενο του βιβλίου Γεωφυσικής, αλλά και πρόσθετη ύλη, διδάχθηκε σε φοιτητές διαφόρων τμημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και άλλων Πανεπιστημίων της χώρας και αποκτήθηκε σημαντική πρόσθετη εμπειρία σχετικά με τον τρόπο που η Γεωφυσική γνώση προσλαμβάνεται από τους φοιτητές των τριτοβάθμιων ακαδημαϊκών ιδρυμάτων. Επιπλέον, ανταλλάχθηκαν απόψεις για διάφορα γεωφυσικά θέματα με συναδέλφους γεωφυσικούς, οι οποίοι έχουν σχετική εκπαιδευτική και ερευνητική εμπειρία και λάβαμε σοβαρά υπόψη μας τις προτάσεις τους. Έτσι, το περιεχόμενο του παρόντος βιβλίου είναι αποτέλεσμα της κοινής προσπάθειας των δύο συγγραφέων του για

την αναπαραγωγή της βασικής γεωφυσικής γνώσης που ισχύει σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο και την αξιοποίηση της σχετικής διδακτικής εμπειρίας.

Το περιεχόμενο ενός πανεπιστημιακού συγγράμματος καθορίζεται συχνά από τις ανάγκες και το επιστημονικό υπόβαθρο των αναγνωστών του. Τα βιβλία Γεωφυσικής μπορούν να χρησιμοποιηθούν από δύο κατηγορίες αναγνωστών: Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει αυτούς που έχουν γεωλογικό επιστημονικό υπόβαθρο και είναι κατά κύριο λόγο φοιτητές των Τμημάτων Γεωλογίας, Γεωπεριβάλλοντος, Ορυκτών Πόρων κλπ. αλλά και επιστήμονες ή επαγγελματίες γεωλόγους, οι οποίοι ενδιαφέρονται για τον τρόπο με τον οποίο η Γεωφυσική συνεισφέρει στην επίλυση θεμελιωδών γεωλογικών προβλημάτων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αυτούς που έχουν κυρίως μαθηματικό υπόβαθρο (μαθηματικοί, φυσικοί, μηχανικοί, κλπ) και ενδιαφέρονται για θέματα Γεωφυσικής. Η βασική γνώση που δίνεται στα κεφάλαια του παρόντος βιβλίου έχει ως στόχο την ανάδειξη της γεωφυσικής-γεωλογικής σημασίας των σχετικών θεμάτων και παρουσιάζεται με τρόπο που μπορεί να προσεγγιστεί και από τις δύο κατηγορίες αναγνωστών. Παράλληλα, στο κείμενο παρέχονται οι βασικές μαθηματικές σχέσεις που είναι χρήσιμες για υπολογισμούς πρακτικής σημασίας και απαραίτητες για τη λύση των ασκήσεων Α' κατηγορίας. Ορισμένες από τις ασκήσεις Β' κατηγορίας αφορούν αποδείξεις των πιο βασικών από τις σχέσεις που παρουσιάζονται στο κείμενο, ενώ οι υπόλοιπες αναφέρονται σε γεωφυσικά προβλήματα υψηλότερου επιπέδου δυσκολίας. Στο τέλος του βιβλίου παρέχονται, σε ξεχωριστό κεφάλαιο, αναλυτικές πληροφορίες και σχήματα για τη διαδικασία λύσης των ασκήσεων.

Αν και η σεισμική δραστηριότητα είναι ένα από τα σημαντικότερα γεωδυναμικά φαινόμενα στη Γη, τα καθαρά τεχνικά σεισμολογικά θέματα δεν εξετάζονται στο παρόν βιβλίο, γιατί παραδοσιακά παρουσιάζονται σε ειδικά βιβλία Σεισμολογίας, όπως το πρόσφατα δημοσιευμένο βιβλίο Σεισμολογίας (Παπαζάχος, Β., Καρακαϊσης, Γ. και Χατζηδημητρίου, Π., 2005). Είναι όμως γνωστό ότι οι σεισμολογικές τεχνικές είναι ιστορικά οι πιο σημαντικές, αλλά και πρακτικά από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για τη λύση γεωφυσικών προβλημάτων που αφορούν το εσωτερικό της Γης. Για το λόγο αυτό σεισμολογικές μέθοδοι αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται στο παρόν βιβλίο για τη λύση διαφόρων γεωφυσικών προβλημάτων (κεφάλαια 2, 3, 8, 9). Για τους ίδιους λόγους δέν εξετάζονται στο παρόν βιβλίο ειδικές εφαρμογές της Γεωφυσικής στην επίλυση προβλημάτων επιφανειακής γεωλογίας, εντοπισμού κοιτασμάτων και γεωτεχνικών-γεωπεριβαλλοντικών προβλημάτων, οι οποίες επίσης εξετάζονται παραδοσιακά από ειδικά βιβλία Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Όμως στο παρόν βιβλίο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές πολλών γεωφυσικών μεθόδων (σεισμικές, βαρυτικές,

μαγνητικές, ραδιομετρικές, κλπ.) και τα γενικά χαρακτηριστικά των κύριων δυναμικών πεδίων της Γης (βαρυτικό και μαγνητικό), που αποτελούν τη γνώση πάνω στην οποία θεμελιώνονται οι κυριότερες τεχνικές της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

Το βιβλίο αυτό αποτελείται από εννέα κεφάλαια. Το **πρώτο** κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και παρέχει γενικές πληροφορίες για τη Γεωφυσική, τη Γη και τη σχέση της με το ηλιακό σύστημα. Το **δεύτερο** κεφάλαιο αφορά τη δομή και σύσταση του εσωτερικού της Γης ενώ το **τρίτο** κεφάλαιο περιλαμβάνει τη Γεωδυναμική. Το **τέταρτο** έχει ως αντικείμενο τη θερμότητα του εσωτερικού της Γης και το **πέμπτο** τη φυσική ραδιενέργεια και τον τρόπο που αυτή χρησιμοποιείται από τις μεθόδους ραδιοχρονολόγησης. Τα δύο βασικά δυναμικά πεδία της Γης, το πεδίο βαρύτητας και το μαγνητικό πεδίο, παρουσιάζονται στο **έκτο** και **έβδομο** κεφαλαίο, αντίστοιχα. Στο **όγδοο** κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές σεισμικές μέθοδοι μελέτης της δομής του εσωτερικού της Γης, που είναι από τις κυριότερες γεωφυσικές μεθόδους που εφαρμόζονται για το σκοπό αυτό. Τέλος, στο **ένατο** κεφάλαιο αναπτύσσονται διάφορα σημαντικά θέματα γεωφυσικών τεχνικών και εφαρμογής ειδικών γεωφυσικών μεθόδων.

Το βιβλίο εκδίδεται με βασικό στόχο να χρησιμοποιηθεί ως διδακτικό σύγγραμμα πανεπιστημιακού επιπέδου, καλύπτοντας την ύλη που διδάσκεται σε προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και άλλων Πανεπιστημίων της χώρας. Έγινε, όμως, προσπάθεια ώστε το περιεχόμενό του να περιλαμβάνει και θέματα ευρύτερου θεωρητικού και πρακτικού ενδιαφέροντος, ώστε να είναι αξιοποιήσιμο και από επιστήμονες που ασχολούνται επαγγελματικά με γενικότερα γεωφυσικά θέματα (γεωφυσικοί, γεωλόγοι, γεωδαίτες, μηχανικοί, κλπ.). Στο τέλος κάθε κεφαλαίου περιλαμβάνονται αναφορές πρόσφατων δημοσιεύσεων σε διεθνή περιοδικά και βιβλία, ώστε να διευκολύνονται οι αναγνώστες που ενδιαφέρονται για ειδικότερη μελέτη γεωφυσικών θεμάτων.

Αποφασιστική υπήρξε η συμβολή των Π. Χατζηδημητρίου και Γ. Καρακαϊση στη βελτίωση του περιεχομένου του βιβλίου, αφού οι παρατηρήσεις τις οποίες έκαναν σε όλα τα κεφάλαια και οι προτεινόμενες αλλαγές συνέβαλαν σημαντικά στην αναβάθμιση του αρχικού κειμένου. Σημαντική υπήρξε και η συμβολή της Ε.Αηδονά στη βελτίωση του περιεχομένου, αλλά και της μορφής του βιβλίου, λύνοντας ασκήσεις και συμβάλλοντας ουσιαστικά στη συγγραφή των αναλυτικών οδηγιών για τη λύση των ασκήσεων.

Οι Δ. Κοντοπούλου, Ε. Παπαδημητρίου, Α. Κυρατζή, Γ. Τσόκας, Θ. Τσάπανος, Δ. Παναγιωτόπουλος, Ε. Σκορδύλης, Β. Καρακώστας, Α. Κορωνάιος, Τ. Σολδάτος και Η. Τζιαβός, οι οποίοι διδάσκουν σχετικά γεωφυσικά, γεωλογικά

και γεωδαιτικά μαθήματα, συνέβαλαν καθοριστικά στη βελτίωση των κεφαλαίων που σχετίζονται με το ερευνητικό τους έργο και υπέδειξαν αλλαγές που βασίζονται και στην εκπαιδευτική εμπειρία τους από την τριτοβάθμια εκπαίδευση. Οι απόψεις τους συνέβαλαν, μεταξύ άλλων, στη διαμόρφωση απλούστερων αλλά συνεκτικότερων ασκήσεων. Τμήμα του Κεφαλαίου 7 (παράγραφος 7.14.5) το οποίο αναφέρεται στην παλαιομαγνητική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στον Ελλαδικό χώρο βασίζεται σε κείμενο της Δ.Κοντοπούλου, η οποία είναι και η συγγραφέας του σημαντικότερου τμήματος της άσκησης που παρουσιάζεται στην παράγραφο 9.3 Η Α. Κυρατζή είναι συν-συγγραφέας της εφαρμογής που αναφέρεται στον τρόπο υπολογισμού της ενεργού παραμόρφωσης από σεισμολογικά στοιχεία και παρουσιάζεται στην παράγραφο 9.2.

Ευχαριστούμε θερμά όλους τους προαναφερόμενους ακαδημαϊκούς συνάδελφους για τη σημαντική τους συμβολή στη διαμόρφωση της ύλης και τη βελτίωση του περιεχομένου του βιβλίου. Ευχαριστούμε, επίσης, ιδιαίτερα τις κ. Δ. Βλάχου και Ε. Κωνσταντινίδου για τη βοήθειά τους σε τεχνικά θέματα που αφορούν το παρόν βιβλίο, αλλά και τη γενικότερή τους συνεχή τεχνική αρωγή και υποστήριξη στις ερευνητικές και εκπαιδευτικές μας δραστηριότητες. Τέλος, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στις εκδόσεις Ζήτη για την άρτια έκδοση του βιβλίου

Σημαντικός παράγοντας για τη δυνατότητα ενασχόλησής μας με τη γεωφυσική γνώση και παιδεία υπήρξε η σταθερή παρουσία της Κατερίνας Παπαζάχου και της Ελίνας Αηδονά, χωρίς τη βοήθεια και υποστήριξη των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η συγγραφή του παρόντος βιβλίου.

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2008

Κ. Παπαζάχος

Β. Παπαζάχος

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1	Αντικείμενο της Γεωφυσικής	1
1.2	Σημασία της Γεωφυσικής	2
1.3	Τρόποι Έρευνας στη Γεωφυσική.....	3
1.4	Σύντομη Ιστορία της Γεωφυσικής.....	5
1.5	Η Γη, το Ηλιακό Σύστημα και το Σύμπαν.....	9
1.5.1	Οι γεώδεις πλανήτες και η Σελήνη	14
1.5.2	Μετεωρίτες και κομήτες.....	16
1.5.3	Η γένεση του σύμπαντος	18
1.5.4	Η γένεση του ηλιακού συστήματος.....	19
1.5.5	Η γένεση και εξέλιξη του εσωτερικού της Γης.....	25
	Βιβλιογραφία.....	26

Κεφάλαιο 2: Δομή και Σύσταση του Εσωτερικού της Γης

2.1	Εισαγωγή.....	29
2.2	Μεταβολή των Ταχυτήτων των Σεισμικών Κυμάτων Χώρου με το Βάθος και Βασικές Ενότητες του Εσωτερικού της Γης.....	33
2.3	Πυκνότητα του Εσωτερικού της Γης	39
2.4	Πίεση στο Εσωτερικό της Γης	47
2.5	Τιμές των Ελαστικών Σταθερών στο Εσωτερικό της Γης	48
2.6	Μεταβολή της Ανελαστικότητας και του Ιξώδους στο Εσωτερικό της Γης	49
2.7	Η Σύσταση του Εσωτερικού της Γης.....	53
2.7.1	Καθορισμός της σύστασης της Γης με απ' ευθείας παρατηρήσεις	54
2.7.2	Καθορισμός της σύστασης του εσωτερικού της Γης με γεωφυσικά δεδομένα.....	56
2.7.3	Δομή και σύσταση του φλοιού της Γης	59
2.7.4	Δομή και σύσταση του μανδύα της Γης	65
2.7.5	Δομή και σύσταση του πυρήνα της Γης	70
2.8	Ανισοτροπία στο Εσωτερικό της Γης.....	72
2.9	Τρισδιάστατη Δομή του Εσωτερικού της Γης.....	76

2.10 Δομή Βάθους στο Χώρο του Αιγαίου	84
Βιβλιογραφία	93
Ασκήσεις	100

Κεφάλαιο 3: Δομή και Σύσταση του Εσωτερικού της Γης

3.1 Εισαγωγή.....	101
3.2 Τα Τρία Παγκόσμια Συστήματα Διάρρηξης.....	105
3.3 Η Μετάθεση των Ηπείρων	115
3.4 Η Θεωρία των Λιθοσφαιρικών Πλακών.....	124
3.5 Ιδιότητες των Ορίων των Λιθοσφαιρικών Πλακών και η Σχέση τους με το Σύστημα των Θερμών Κηλίδων.....	133
3.6 Σχετικές Κινήσεις των Λιθοσφαιρικών Πλακών.....	142
3.7 Δυνάμεις που Ασκούνται στις Κινούμενες Λιθοσφαιρικές Πλάκες	152
3.8 Απόλυτες Κινήσεις των Λιθοσφαιρικών Πλακών	154
3.9 Ορογένεση και Λιθοσφαιρικές Πλάκες.....	159
3.10 Τα Αίτια Κίνησης των Λιθοσφαιρικών Πλακών	161
3.11 Ενεργός Τεκτονική του Ελληνικού Χώρου	165
Βιβλιογραφία	167
Ασκήσεις	171

Κεφάλαιο 4: Θερμότητα του Εσωτερικού της Γης

4.1 Εισαγωγή.....	175
4.2 Η Ροή Θερμότητας από το Εσωτερικό της Γης.....	179
4.2.1 Η θερμική αγωγιμότητα στο εσωτερικό της Γης	179
4.2.2 Η θερμοβαθμίδα στο εσωτερικό της Γης.....	181
4.2.3 Η ροή θερμότητας στους ωκεανούς.....	182
4.2.4 Η ροή θερμότητας στις ηπείρους	185
4.2.5 Χωρική κατανομή της ολικής ροής θερμότητας	189
4.3 Πηγές Θερμότητας στο Εσωτερικό της Γης.....	190
4.4 Η Θερμοκρασία στο Εσωτερικό της Γης	195
4.4.1 Προσδιορισμός της θερμοκρασίας στο μανδύα της Γης	195
4.4.2 Προσδιορισμός της θερμοκρασίας στον πυρήνα της Γης	198
4.4.3 Το σημείο τήξης στο μανδύα και στον πυρήνα	198
4.4.4 Πρόσφατα αποτελέσματα για τη θερμοκρασία του εσωτερικού της Γης.....	199
4.5 Η Εξίσωση της Θερμικής Αγωγιμότητας και οι Εφαρμογές της	201

4.5.1 Το θερμικό μοντέλο ημικύριου της ωκεάνιας λιθόσφαιρας.....	205
4.5.2 Γεώθερμες.....	208
4.5.3 Η θερμική ιστορία της Γης.....	211
4.6 Διάδοση Θερμότητας με Μεταφορά στο Εσωτερικό της Γης.....	215
Βιβλιογραφία.....	218
Ασκήσεις.....	220

Κεφάλαιο 5: Φυσική Ραδιενέργεια και Μέθοδοι Ραδιοχρονολόγησης

5.1 Εισαγωγή.....	223
5.2 Νόμος των Ραδιενεργών Διασπάσεων.....	225
5.3 Αρχή των Μεθόδων Ραδιοχρονολόγησης.....	226
5.4 Μέθοδοι Ραδιοχρονολόγησης.....	229
5.4.1 Απλά ρολόγια διάσπασης: Κοσμική ακτινοβολία και χρονολόγηση με τον ^{14}C και ^{36}Cl	230
5.4.2 Αθροιστικά ρολόγια διάσπασης: Η μέθοδος Καλίου-Αργού (K-Ar).....	236
5.4.3 Χρήση ισόχρονων: Η μέθοδος Ρουβιδίου-Στροντίου (Rb-Sr).....	239
5.4.4 Μέθοδοι Ουρανίου-Μολύβδου (U-Pb).....	244
5.4.5 Μέθοδος Μολύβδου-Μολύβδου (Pb-Pb).....	247
5.4.6 Μέθοδος Θωρίου-Μολύβδου (Th-Pb).....	248
5.4.7 Σπάνιες γαίες και γεωδυναμική εξέλιξη της Γης: Το ραδιενεργό ζεύγος Σαμάριο - Νεοδύμιο (Sm-Nd).....	249
5.5 Η Ηλικία της Γης και η Γεωλογική Κλίμακα Χρόνου.....	253
Βιβλιογραφία.....	257
Ασκήσεις.....	259

Κεφάλαιο 6: Το Πεδίο Βαρύτητας, οι Παλίρροιες και οι Γεωφυσικές Σημασιές Κινήσεις της Γης

6.1 Εισαγωγή.....	261
6.2 Η Ένταση και το Δυναμικό του Πεδίου Βαρύτητας της Γης.....	263
6.3 Ισοδυναμικές Επιφάνειες.....	265
6.4 Το Εξωτερικό Πεδίο Βαρύτητας της Γης.....	270
6.5 Η Εξίσωση του Σφαιροειδούς και του Ελλειψοειδούς της Γης.....	275
6.6 Προσδιορισμός του Πεδίου Βαρύτητας με Επίλυση της Σχέσης του Laplace.....	278
6.7 Μετρήσεις του Πεδίου Βαρύτητας της Γης.....	281

6.8 Το Γεωειδές και η Σχέση του με το Ελλειψοειδές της Γης	284
6.9 Μεταβολές και Διορθώσεις της Έντασης της Βαρύτητας της Γης	291
6.10 Ισοστασία	297
6.11 Ισοστατικό Αποτέλεσμα	301
6.12 Ισοστατική Ανωμαλία	304
6.13 Ο Αληθινός Μηχανισμός Βαρυτικής Αντιστάθμισης	305
6.14 Κατανομή των Ανωμαλιών Βαρύτητας στην Επιφάνεια της Γης και Ερμηνεία τους	307
6.15 Παλίρροιες της Γης	312
6.15.1 Οι παλίρροιες της Γης και οι πληροφορίες που παρέχουν για τη δομή της	312
6.15.2 Παλιρροιακή Τριβή	320
6.16 Γεωφυσικής Σημασίας Κινήσεις της Γης	322
<i>Βιβλιογραφία</i>	327
<i>Ασκήσεις</i>	330

Κεφάλαιο 7: Το Μαγνητικό Πεδίο της Γης

7.1 Εισαγωγή	333
7.2 Θεμελιώδη Μαγνητικά Μεγέθη	334
7.3 Στοιχεία του Μαγνητικού Πεδίου της Γης	336
7.4 Γεωγραφική Μεταβολή του Μαγνητικού Πεδίου της Γης	339
7.5 Μαγνητικό Πεδίο Διπόλου και Ομοιόμορφα Μαγνητισμένης Σφαίρας	344
7.6 Το Κύριο Μαγνητικό Πεδίο της Γης	347
7.7 Κανονικό και μη Κανονικό Μαγνητικό Πεδίο της Γης	354
7.8 Τα Αίτια του Κυρίου Μαγνητικού Πεδίου της Γης	356
7.9 Θεωρία της Αυτοδιεγείρομενης Ηλεκτρικής Γεννήτριας	359
7.10 Χρονικές Μεταβολές του Κυρίου Μαγνητικού Πεδίου	365
7.11 Παροδικές Μεταβολές του Μαγνητικού Πεδίου της Γης	368
7.12 Τελλουρικά Ρεύματα	371
7.13 Μεταβολή της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας στο Εσωτερικό της Γης	372
7.14 Παλαιομαγνητισμός	374
7.14.1 Είδη παραμένουσας μαγνήτισης	376
7.14.2 Παλαιομαγνητικές μετρήσεις	380
7.14.3 Υπολογισμός του παλαιομαγνητικού πλάτους και των γεωγραφικών συντεταγμένων του παλαιομαγνητικού πόλου	382
7.14.4 Γεωφυσική σημασία του Παλαιομαγνητισμού	383
7.14.5 Παλαιομαγνητική έρευνα στον Ελληνικό χώρο	395

Βιβλιογραφία.....	397
Ασκήσεις.....	400

Κεφάλαιο 8: Σεισμικές Μέθοδοι Καθορισμού της Δομής του Εσωτερικού της Γης

8.1 Εισαγωγή.....	403
8.2 Γενικά Στοιχεία για τη Διάδοση των Σεισμικών Κυμάτων στη Γη	405
8.3 Αξιοποίηση των Χρόνων Διαδρομής των Κυμάτων Χώρου για τον Προσδιορισμό των Ταχυτήτων στο Εσωτερικό τη Γης.....	410
8.4 Κανονική Μεταβολή της Ταχύτητας με το Βάθος για Σφαιρική Γη	413
8.5 Καθορισμός της Ταχύτητας σε Συνάρτηση με το Βάθος.....	416
8.6 Καθορισμός της Δομής του Φλοιού από τους Χρόνους Διαδρομής των Κυμάτων Χώρου	422
8.6.1 Φλοιός ενός στρώματος.....	422
8.6.2 Φλοιός η οριζοντίων στρωμάτων.....	426
8.6.3 Αξιοποίηση αναγραφών ανάκλασης για τη μελέτη της δομής του φλοιού με τη μέθοδο σώρευσης κοινού μέσου σημείου.....	434
8.7 Μέθοδος των Πλατών	437
8.8 Καθορισμός της Δομής με τη Μέθοδο των Επιφανειακών Κυμάτων.....	448
8.9 Καθορισμός της Δομής με τη Χρήση των Ελεύθερων Ταλαντώσεων της Γης	459
8.10 Αντιστροφή Σεισμικών Δεδομένων για τον Προσδιορισμό της Δομής της Γης	464
8.11 Σεισμική Τομογραφία και Τρισδιάστατη Δομή της Γης.....	471
Βιβλιογραφία.....	479
Ασκήσεις.....	481

Κεφάλαιο 9: Εφαρμογές Γεωφυσικών Μεθόδων

9.1 Εισαγωγή.....	483
9.2 Καθορισμός της Ενεργού Παραμόρφωσης του Φλοιού.....	484
9.3 Χρήση Παλαιομαγνητικών Δεδομένων για τον Υπολογισμό της Κίνησης Λιθοσφαιρικών Πλακών.....	489
9.4 Σχέσεις Ελαστικών Σταθερών, Ταχύτητας Κυμάτων, Πυκνότητας και Πίεσης στο Εσωτερικό της Γης	498
9.5 Η Ροπή Αδράνειας και η Δομή Πυκνότητας της Γης.....	502

9.6	Μεθοδολογία Καθορισμού της Χημικής Σύστασης του Εσωτερικού της Γης με Γεωφυσικά Στοιχεία	506
9.7	Εφαρμογή της Μεθόδου Herglotz - Wiechert για τον Καθορισμό της Δομής Ταχύτητας της Σελήνης.....	510
9.8	Καθορισμός της Δομής της Γης με τη Μέθοδο της Σκέδασης των Κυμάτων Rayleigh.....	515
9.9	Η Συνάρτηση Σφάλματος $\text{erf}(x)$ και το Θερμικό Μοντέλο Ημιχώρου της Ωκεάνιας Λιθόσφαιρας.....	519
9.10	Το Σύστημα Σφαιρικών Συντεταγμένων και το Σχήμα της Γης	523
9.11	Σφαιρικές Αρμονικές Συναρτήσεις.....	531
	Βιβλιογραφία	538

Λύσεις των Ασκήσεων

Λύσεις 2 ^{ου} Κεφαλαίου	539
Λύσεις 3 ^{ου} Κεφαλαίου	543
Λύσεις 4 ^{ου} Κεφαλαίου	549
Λύσεις 5 ^{ου} Κεφαλαίου	552
Λύσεις 6 ^{ου} Κεφαλαίου	556
Λύσεις 7 ^{ου} Κεφαλαίου	561
Λύσεις 8 ^{ου} Κεφαλαίου	564

Ευρετήριο Όρων.....	571
----------------------------	------------

1^ο

Κεφάλαιο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της Γεωφυσικής

Γεωφυσική, με την ευρύτερη έννοια του όρου, είναι η επιστήμη που εφαρμόζει νόμους της Φυσικής για να μελετήσει τη Γη. Με την έννοια αυτή η Γεωφυσική μελετάει τις φυσικές ιδιότητες της Γης από το κέντρο της μέχρι την εξωτερική ατμόσφαιρα, περιλαμβάνοντας κλάδους όπως είναι οι Ατμοσφαιρικές Επιστήμες, οι Βιογεωεπιστήμες, η Γεωμορφολογία, η Ωκεανογραφία, η Φυσική του Εσωτερικού της Στερεάς Γης, κλπ.

Αν και το παραπάνω περιεχόμενο είναι αποδεκτό σε ορισμένες χώρες και επιστημονικές ενώσεις (π.χ. American Geophysical Union στις Η.Π.Α., κλπ.), έχει επικρατήσει ιστορικά η Γεωφυσική να ταυτίζεται σχεδόν με τη Φυσική της 'Στερεάς' Γης (Solid Earth Geophysics), δηλαδή με τη Φυσική του Εσωτερικού της Γης, ενώ για τις άλλες επιστήμες που μελετούν τις φυσικές ιδιότητες των ωκεανών, της ατμόσφαιρας, κλπ. χρησιμοποιούνται ειδικά ονόματα, όπως Ωκεανογραφία, Μετεωρολογία, Φυσική της Ατμόσφαιρας, κλπ. Με αυτή τη στενότερη έννοια χρησιμοποιείται εδώ η λέξη Γεωφυσική.

Από άποψης μεθόδων έρευνας η Γεωφυσική ανήκει στους εφαρμοσμένους κλάδους της Φυσικής ενώ από άποψης αντικειμένου αποτελεί κλάδο των Γεωεπιστημών, όπου ανήκουν η Γεωλογία, η Γεωχημεία, η Γεωδαισία και η Γεωγραφία.

Αντικείμενο της Φυσικής του Εσωτερικού της Γης είναι η δομή του εσωτερικού της Γης, το πεδίο βαρύτητας της Γης, το γεωμαγνητικό και το γεωηλεκτρικό πεδίο, οι γεωθερμικές μεταβολές, οι μέθοδοι ραδιοχρονολόγησης και η Γεωδυναμική. Κλάδο επίσης της Γεωφυσικής αποτελεί η Σεισμολογία, αλλά λόγω της ευρύτητάς της συνήθως αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητο μάθημα και επιστημονικό αντικείμενο και συνήθως εκδίδονται ιδιαίτερα βιβλία Σεισμολογίας. Αντίστοιχα, κλάδο της Γεωφυσικής αποτελεί και η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική που α-

σχολείται με τη μελέτη των επιφανειακότερων στρωμάτων της Γης, με έμφαση σε στόχους οικονομικού, γεωτεχνικού, πολιτισμικού και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος και η οποία επίσης συνήθως εξετάζεται ως ανεξάρτητο επιστημονικό αντικείμενο. Θα πρέπει βέβαια να επισημανθεί ότι τα όρια Σεισμολογίας-Φυσικής Εσωτερικού της Γης-Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής είναι συχνά δυσδιάκριτα ή και μή υφιστάμενα, αφού στοιχεία και τεχνικές του ενός κλάδου χρησιμοποιούνται είτε αυτούσια είτε με παραλλαγές από τους άλλους.

Σήμερα η Γεωφυσική ασχολείται και με τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων και άλλων ουράνιων σωμάτων όπως είναι η Σελήνη και οι γεώδεις κυρίως πλανήτες (Άρης, Αφροδίτη, Ερμής) και δορυφόροι, αλλά και ο Ήλιος (π.χ. ελεύθερες ταλαντώσεις Ήλιου, κλπ.). Με γεωφυσικές μεθόδους έχουν ήδη αποκτηθεί οι πρώτες βασικές γνώσεις που αφορούν τη δομή του εσωτερικού της Σελήνης και άλλες ιδιότητες αυτής.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο μελετητής του εσωτερικού της Γης πρέπει απαραίτητα να έχει αρκετές γνώσεις Φυσικής και Μαθηματικών. Πέρα από αυτές, απαραίτητες είναι οι βασικές γνώσεις Γεωλογίας. Πολύ χρήσιμες είναι επίσης γνώσεις που αφορούν άλλες γεωεπιστήμες, όπως είναι η Γεωχημεία, η Γεωδαισία, κλπ.

1.2 Σημασία της Γεωφυσικής

Η Γεωφυσική είναι εφαρμοσμένη επιστήμη και συνεπώς η γεωφυσική έρευνα έχει βασικά ως άμεσο (εφαρμοσμένη γεωφυσική έρευνα) ή έμμεσο (βασική γεωφυσική έρευνα) στόχο την αξιοποίηση των γεωφυσικών γνώσεων για πρακτικούς σκοπούς. Παρόλα αυτά, πολλά από τα συμπεράσματα της βασικής γεωφυσικής έρευνας παρουσιάζουν μεγάλο θεωρητικό ενδιαφέρον και απαντούν σε θεμελιώδη ερωτήματα του ανθρώπου σχετικά με τον πλανήτη όπου ζει, αλλά και σχετικά με το σύμπαν.

Η μεγάλη πρακτική σημασία της Γεωφυσικής οφείλεται, βασικά, στο ότι με γεωφυσικές μεθόδους:

- α) εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης γεωλογικές δομές οικονομικής σημασίας, δηλαδή, δομές που σχετίζονται με κοιτάσματα πετρελαίου, φυσικών αερίων, μεταλλευμάτων, ορυκτού άλατος, ορυκτών ανθράκων, ουρανίου και πηγών γεωθερμικής ενέργειας και,
- β) μελετώνται η δομή και οι γεωδυναμικές διαδικασίες στο φλοιό και στον άνω μανδύα της Γης, οι οποίες καθορίζουν τις θέσεις πολλών δομών οικονομικής σημασίας.

Από το άλλο μέρος, συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της δομής και σύστασης του πυρήνα και του μανδύα της Γης, της πηγής και του μηχανισμού γένεσης του γεωμαγνητικού πεδίου, των γεωθερμικών μεταβολών κλπ., καθώς και ανάλογες ιδιότητες τόσο της Σελήνης (που μελετήθηκαν πρόσφατα) όσο και των γεωδών πλανητών (που θα μελετηθούν προσεχώς) είναι αποφασιστικής σημασίας για τη κατανόηση του τρόπου γένεσης και εξέλιξης των σωμάτων αυτών.

1.3 Τρόποι Έρευνας στη Γεωφυσική

Η μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της στερεάς Γης πραγματοποιείται με τρεις βασικούς τρόπους που, κατά σειρά σπουδαιότητας, είναι η συλλογή και ερμηνεία επιστημονικών παρατηρήσεων που γίνονται απευθείας στη φύση, η θεωρητική (φυσικομαθηματική) έρευνα και η πραγματοποίηση πειραμάτων στο εργαστήριο. Σπάνια καθένας απ' αυτούς τους γενικούς τρόπους έρευνας εφαρμόζεται μόνος του ενώ συνήθως εφαρμόζονται δύο ή και οι τρεις μαζί.

Η γεωφυσική έρευνα βασίζεται, κατά κύριο λόγο, στη συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία γεωφυσικών παρατηρήσεων που γίνονται **απευθείας στη φύση με γεωφυσικά όργανα**. Κατά τη διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέτρηση διαφόρων φυσικών ποσοτήτων και η ερμηνεία αυτών σε συνάρτηση με άλλες φυσικές ποσότητες που περιγράφουν αμεσότερα τις ιδιότητες της Γης και τις φυσικές διαδικασίες στο εσωτερικό της.

Οι φυσικές ποσότητες που συνήθως μετράμε είναι οι χρόνοι διαδρομής, οι περίοδοι και τα πλάτη των σεισμικών κυμάτων, η ένταση του πεδίου βαρύτητας και του γεωμαγνητικού πεδίου, η ροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης, η ραδιενέργεια των πετρωμάτων της Γης κλπ., τα δε όργανα που χρησιμοποιούνται είναι τα σεισμόμετρα, βαρυτόμετρα, μαγνητόμετρα, θερμόμετρα, μετρητές ραδιενέργειας, κλπ.

Τα φυσικά μεγέθη που επιδιώκουμε συνήθως να καθορίσουμε είναι οι ελαστικές σταθερές, η πυκνότητα, η πίεση, η θερμοκρασία, κλπ. στο εσωτερικό της Γης, γιατί τα μεγέθη αυτά μας δίνουν πληροφορίες για τη φυσική κατάσταση και σύσταση του υλικού, τις κινήσεις και γενικά τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης.

Η Γεωφυσική παίρνει σοβαρά υπόψη και τις παρατηρήσεις που γίνονται **απευθείας στη φύση χωρίς γεωφυσικά όργανα**, γιατί οι παρατηρήσεις αυτές είναι άμεσες και συνεπώς περισσότερο ασφαλείς. Τέτοιες παρατηρήσεις αφορούν, βασικά, διάφορα γεωδυναμικά φαινόμενα που παρατηρούνται στην επιφάνεια της

Γης, όπως είναι οι παραμορφώσεις και διαρρήξεις της επιφάνειας της Γης (πτωχώσεις, ωκεάνιες τάφροι, μεσωκεάνιες ράχες, μεγάλα ρήγματα, κλπ.), οι ηφαιστειακές και γεωθερμικές εκδηλώσεις, τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των σεισμών κλπ. Οποιαδήποτε γενική υπόθεση ή θεωρία που αφορά τη Γη πρέπει να ερμηνεύει τις αντικειμενικές αυτές παρατηρήσεις που αποτελούν οριακές συνθήκες για πολλά σημαντικά γεωφυσικά προβλήματα.

Για τον καθορισμό των ιδιοτήτων και των φυσικών διαδικασιών στο εσωτερικό της Γης από παρατηρήσεις στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιούνται θεωρητικές **εξισώσεις** που εκφράζουν φυσικούς νόμους. Πολλές φορές όμως πρέπει να γίνει θεωρητική διερεύνηση των εξισώσεων, γιατί αυτές πρέπει να εφαρμοσθούν σε περιοχές συνθηκών (π.χ. πίεσης) πολύ πέρα από τη περιοχή για την οποία αρχικά διατυπώθηκαν.

Από το άλλο μέρος, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που δεν είναι δυνατός ο απευθείας υπολογισμός ενός μεγέθους στο εσωτερικό της Γης (π.χ. της πυκνότητας) από μετρήσεις στην επιφάνειά της. Στις περιπτώσεις αυτές εκπονούνται διάφορα θεωρητικά **μοντέλα** και εκείνο από αυτά που ικανοποιεί τις γεωφυσικές παρατηρήσεις θεωρείται ότι παριστάνει καλύτερα την πραγματικότητα.

Η **εργαστηριακή έρευνα** δεν έχει τόσο μεγάλη σημασία για τη Γεωφυσική όσο για άλλες επιστήμες, όπως είναι η Φυσική, η Χημεία κλπ., συνέβαλε όμως σημαντικά στη λύση ορισμένων γεωφυσικών προβλημάτων και γι' αυτό αποτελεί σήμερα απαραίτητο συμπλήρωμα των άλλων τρόπων έρευνας. Εργαστηριακά πειράματα πραγματοποιούνται για την ποσοτική μελέτη του συνδυασμένου αποτελέσματος πάνω σε δείγματα πετρωμάτων της πίεσης και της θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στις συνθήκες οι οποίες επικρατούν στο εσωτερικό της Γης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών εκφράζουν τόσο καλύτερα τις συνθήκες στα διάφορα βάθη του εσωτερικού της Γης όσο μικρότερα είναι τα βάθη αυτά.

Οι αριθμητικές τιμές ορισμένων φυσικών σταθερών στο εσωτερικό της Γης βρίσκονται πολύ πέρα από τις γνωστές τιμές αυτών που καθορίζονται κάτω από συνηθισμένες εργαστηριακές συνθήκες. Γι' αυτό, επιδιώκεται η δημιουργία ειδικών εργαστηριακών συνθηκών. Ως παράδειγμα αναφέρουμε την εργαστηριακή παραγωγή βραχύχρονων ελαστικών κυμάτων (shock waves), κατά τη γένεση των οποίων δημιουργείται πίεση της ίδιας τάξης με αυτή που επικρατεί στο εσωτερικό της Γης και η οποία δε μπορεί να δημιουργηθεί με τις συνηθισμένες εργαστηριακές μεθόδους.

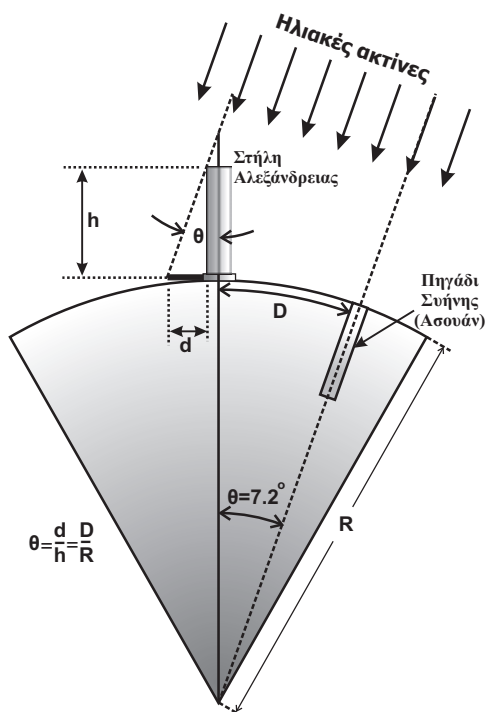
Πολλές φορές πραγματοποιούνται εργαστηριακά πειράματα πάνω σε μοντέλα ολόκληρης της Γης ή τμημάτων αυτής για την εξαγωγή γεωφυσικών συμπερασμάτων που αφορούν φυσικές καταστάσεις και διαδικασίες, γιατί εμφανίζο-

νται σημαντικές δυσκολίες κατά τη θεωρητική αντιμετώπιση των σχετικών προβλημάτων.

Τα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα είναι δύσκολα αφού η ‘ανατομία’ και η ‘φυσιολογία’ του εσωτερικού της Γης είναι πολύπλοκες και απρόσιτες στην άμεση παρατήρηση. Από το άλλο μέρος, ο ακριβής υπολογισμός πολλών γεωφυσικών μεγεθών είναι σχεδόν αδύνατος και το γεωφυσικό υλικό παρατήρησης σπάνια είναι ομογενές ή ακόμα και επαρκές, γι’ αυτό, η ακριβής ανάλυση των παρατηρήσεων είναι αδύνατη. Αυτοί είναι οι λόγοι για τους οποίους στη Γεωφυσική, όπως και σε άλλους κλάδους των Γεωεπιστημών, απλές προτάσεις λύσης επιστημονικών προβλημάτων θεωρούνται ως «επιστημονικές υποθέσεις» και πολλές φορές αναφέρονται και ως «θεωρίες». Ο τρόπος αυτός χρησιμοποίησης επιστημονικών όρων και εννοιών είναι γνωστός και γίνεται δεκτός από τους γεωλόγους, προκαλεί όμως συχνά αντιδράσεις στους φυσικούς ή άλλους θετικούς επιστήμονες που δεν έχουν εξοικειωθεί με τη γεωφυσική έρευνα.

1.4 Σύνοψη Ιστορία της Γεωφυσικής

Οι προσπάθειες κατανόησης του πλανήτη μας άρχισαν πριν από χιλιάδες χρόνια (στην αρχαία Αίγυπτο, Βαβυλώνα, Κίνα, κλπ.). Όμως, είναι οι αρχαίοι Έλληνες εκείνοι που πρώτοι πραγματοποίησαν σχετικές μετρήσεις. Έτσι, ο πρώτος υπολογισμός της περιφέρειας της Γης έγινε από τον Ερατοσθένη (275-194 π.Χ.) με μία μέθοδο που βασίζεται σε μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο σημείων της και είναι παρόμοια με τις μεθόδους που εφαρμόζονται σήμερα για το σκοπό αυτό. Ο Ερατοσθένης μέτρησε την απόσταση μεταξύ της Σύνης (Ασουάν) και της Αλεξάνδρειας (με βάση το χρόνο στον οποίο καμήλες διέτρεχαν την απόσταση αυτή των μερικών χιλιομέτρων κατά μήκος του Νείλου ποταμού). Προσδιόρισε, επίσης, τις διευθύνσεις της κατακόρυφου στις δύο πόλεις με βάση την παρατήρηση ότι οι ηλιακές ακτίνες που φωτίζουν κάθετα το πυθμένα ενός πηγαδιού στη Σύνη ορίζουν την κατακόρυφο στον τόπο αυτό ενώ κατά τον ίδιο χρόνο μία στήλη στην Αλεξάνδρεια δημιουργούσε μία συγκεκριμένη σκιά. Βρήκε, έτσι, ότι η γωνία μεταξύ των κατακόρυφων στις δύο πόλεις ήταν περίπου 7.2° (σχ. 1.1), δηλαδή ίση με το $1/50$ περίπου της περιφέρειας κύκλου ($=360^\circ$), οπότε η περίμετρος της Γης πρέπει να είναι 50 φορές μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ των δύο πόλεων (5000 στάδια). Η τιμή που προσδιόρισε ο Ερατοσθένης ήταν περίπου 250000 στάδια, η οποία με βάση το Αττικό στάδιο (~ 185 m) οδηγεί σε μία τιμή (~ 46000 km) που είναι κοντά στη γνωστή σήμερα τιμή της περιφέρειας της Γης (~ 40000 km).



Σχήμα 1.1. Σχήμα στο οποίο βασίστηκε ο Ερατοσθένης για να υπολογίσει το μήκος της περιφέρειας της Γης, με βάση την απόσταση D μεταξύ της Σήνης (Ασουάν) και της Αλεξάνδρειας και τη γωνία ($\sim 7.2^\circ$) μεταξύ των κατακόρυφων στις δύο πόλεις.

Από την αρχαία Κινεζική βιβλιογραφία προκύπτει ότι η ιδιότητα μιας μαγνητισμένης ράβδου να προσανατολίζεται κατά τη διεύθυνση βορρά – νότου ήταν γνωστή στη χώρα αυτή από το 150 π.Χ. περίπου, οπότε κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε η πρώτη μαγνητική πυξίδα. Ο P. Peregrinus πραγματοποίησε σειρά πειραμάτων με φυσικούς μαγνήτες τα οποία περιγράφει το 1269 στο έργο του 'Epistola de Magnete', από όπου προκύπτει ότι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο μαγνήτης έχει δύο πόλους και ότι τότε ήταν γνωστό ότι η βελόνα της πυξίδας δείχνει τον πολικό αστέρα. Ο Mercator ήταν ο πρώτος που συμπέρανε το 1546 οριστικά ότι ο μαγνητικός πόλος που δείχνει η πυξίδα είναι στη Γη. Το 1600 ο W. Gilbert δημοσίευσε το περίφημο βιβλίο του με τίτλο 'De Magnete' το οποίο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα πειραμάτων του στο μαγνητισμό. Στο βιβλίο αυτό διατυπώνεται για πρώτη φορά η άποψη ότι η Γη μπορεί να θεωρηθεί ως πελώριος μαγνήτης, δηλαδή ότι ο γεωμαγνητισμός οφείλεται σε όλη τη Γη. Οι πρώτες ακριβείς μετρήσεις των στοιχείων του γεωμαγνητικού πεδίου έγιναν από τον Gauss το 1834.

Η μεταβολή της έντασης του πεδίου βαρύτητας από τόπο σε τόπο στην επιφάνεια της Γης ανακαλύφθηκε το 1672 από τον J. Richer ο οποίος παρατήρησε ότι ένα ρολόι που το εκκρεμές του ρυθμίστηκε να χτυπάει τα δευτερόλεπτα στο Παρίσι έχανε 2.5 λεπτά περίπου στην Cayenne της Γαλλικής Γουιάνας. Η πρώτη σοβαρή προσπάθεια να μελετηθεί το σχήμα της Γης με βαρυτομετρικές μεθόδους έγινε από μια αποστολή στο Περού από το Γάλλο Bouguer κατά την οκταετία 1735-1743. Η διατύπωση από τον Airy (1855) και τον Pratt (1854) των αντίστοιχων δύο υποθέσεων για την υδροστατική ισορροπία των τεμαχίων του φλοιού αποτέλεσαν τη βάση της θεωρίας της Ισοστασίας. Από αυτές τις έρευνες ανακαλύφθηκε η ύπαρξη της λιθόσφαιρας, που αποτέλεσε, μετά από έναν αιώνα περίπου, τη βάση της θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών.

Οι πρώτες προσπάθειες για τη μελέτη της δομής του εσωτερικού της Γης έγιναν περί το τέλος του 19^{ου} αιώνα, όταν τέθηκαν σε συστηματική λειτουργία οι πρώτοι αξιόπιστοι σειсмоγράφοι ενώ οι πρώτες γενικές γνώσεις για τη δομή αποκτήθηκαν γύρω στο τέλος της πρώτης δεκαετίας του 20^{ου} αιώνα. Έτσι, ο φλοιός της Γης αναγνωρίστηκε από τον J. Milne το 1906 και η ασυνέχεια μεταξύ του φλοιού και του μανδύα προσδιορίστηκε από τον A. Mohorovicic το 1909 και γι' αυτό αυτή είναι σήμερα γνωστή ως «ασυνέχεια Mohorovicic» (ή Moho). Ο πυρήνας της Γης ανακαλύφθηκε το 1906 από τον D. Oldham και το 1913 ο B. Gutenberg καθόρισε με ακρίβεια την ασυνέχεια μεταξύ μανδύα και πυρήνα, η οποία φέρει το όνομα του. Το 1936 η σεισμολόγος Inge Lehmann (πέθανε το 1993 σε ηλικία 104 ετών) ανακάλυψε την ασυνέχεια μεταξύ του εξωτερικού υγρού πυρήνα και του εσωτερικού στερεού πυρήνα, η οποία επίσης φέρει το όνομά της.

Το 1915 ο Γερμανός μετεωρολόγος A. Wegener (1915, 1924) δημοσίευσε βιβλίο όπου παρουσίασε στοιχεία για την μετάθεση των ηπείρων. Το 1962 ο Αμερικανός γεωλόγος H. Hess υποστήριξε ότι η μετάθεση των ηπείρων πραγματοποιείται με 'επέκταση του θαλάσσιου πυθμένα' και κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας αναπτύχθηκε η 'θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών'.

Τεράστια επίπτωση στις γεωεπιστήμες είχε η ανακάλυψη της ραδιενέργειας από τον H. Becquerel το 1896. Ένας από τους βασικούς λόγους της σημασίας αυτής της ανακάλυψης είναι το γεγονός ότι με μεθόδους ραδιοχρονολόγησης προσδιορίστηκε η ηλικία της Γης σε 4.6 δισεκατομμύρια έτη (4.6×10^9 yrs) ενώ οι προηγούμενες εκτιμήσεις που βασιζόνταν σε διάφορες φυσικές και γεωλογικές μεθόδους έδιναν τιμές μέχρι 25 εκατομμύρια έτη (25×10^6 yrs) μόνο. Οι πρώτες προσπάθειες εφαρμογής της ραδιοχρονολόγησης έγιναν από τον Rutherford (1907) και ο Boltwood πραγματοποίησε τις πρώτες ραδιοχρονολογήσεις με τη μέθοδο ουρανίου-μολύβδου.

Σημαντικά συνέβαλαν στην ανάπτυξη της Γεωφυσικής τα ‘Διεθνή Γεωφυσικά Έτη’ που είναι χρονικά διαστήματα κατά τα οποία με κοινή συμφωνία επιστήμονες διαφόρων χωρών συνεργάστηκαν για την πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας, με την ευρύτερη σημασία του όρου ‘Γεωφυσική’. Το πρώτο διεθνές γεωφυσικό έτος ήταν το 1882-1883, κατά το οποίο έγιναν μεταξύ άλλων και παρατηρήσεις που αφορούσαν το βόρειο σέλας και το μαγνητικό πόλο της Γης. Το δεύτερο διεθνές γεωφυσικό έτος ήταν το 1932-1933 κατά το οποίο έγιναν κυρίως έρευνες για την ασύρματη τηλεπικοινωνία. Το τρίτο γεωφυσικό έτος ήταν το 18μηνο από 1-7-1957 μέχρι 31-12-1958, κατά το οποίο συγκεντρώθηκε σημαντικό γεωφυσικό υλικό και τέθηκαν οι βάσεις για τη λύση πολλών σύγχρονων γεωφυσικών προβλημάτων. Το σημαντικότερο, ίσως, σταθμό στην ιστορία της Φυσικής του Εσωτερικού της Γης αποτέλεσε το ‘πρόγραμμα του πάνω μανδύα’. Αυτό προτάθηκε το 1960 ως ένα πρόγραμμα διεθνούς συνεργασίας για την έρευνα της στερεάς Γης. Το διάστημα 1960-1964 ήταν μία περίοδος σχεδιασμού του προγράμματος αυτού, το οποίο εκπονήθηκε κατά το διάστημα 1965-1970 οπότε πραγματοποιήθηκαν και τα μεγαλύτερα επιτεύγματά του. Με βάση το πρόγραμμα αυτό μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του πάνω μανδύα, όπου βρίσκονται τα αίτια όλων σχεδόν των γεωδυναμικών φαινομένων που παρατηρούνται στην επιφάνεια της Γης.

Η συλλογή τεράστιου υλικού γεωφυσικών παρατηρήσεων με σύγχρονα γεωφυσικά όργανα μεγάλης ακρίβειας κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες και η γρήγορη επεξεργασία του υλικού αυτού με ηλεκτρονικούς υπολογιστές μεγάλης ταχύτητας και μνήμης, η θεωρητική έρευνα που αφορά τη μελέτη των εξισώσεων της κατάστασης της ύλης και η εργαστηριακή έρευνα που αφορά την ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων με κύματα στιγμιαίας διάρκειας συνέβαλαν στην αλματώδη ανάπτυξη της Γεωφυσικής.

Έτσι, κατά το διάστημα αυτό, ανακαλύφθηκαν οι αναστροφές του γεωμαγνητικού πεδίου και εντοπίστηκε οριστικά η πηγή του πεδίου αυτού στον πυρήνα της Γης, επαληθεύτηκε η μετάθεση των ηπείρων και η θεωρία της Ισοστασίας, διερευνήθηκαν οι πηγές της γεωθερμότητας, επινοήθηκαν και εφαρμόστηκαν νέες γεωφυσικές μέθοδοι, όπως είναι η μέθοδος μελέτης της Γης με βάση την ελεύθερη ταλάντωση αυτής, υποδείχθηκαν νέες θεωρίες, όπως είναι η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών που θεωρείται για τις γεωεπιστήμες ως επιστημονικό ‘Παράδειγμα’ (όπως θεωρείται η θεωρία του Κέπλερ για την Αστρονομία, οι θεωρίες του Νεύτωνα και του Αϊνστάιν για τη Φυσική, η θεωρία της εξέλιξης για τη Βιολογία, κλπ.) και επεκτάθηκε η γεωφυσική έρευνα στη Σελήνη για την οποία αποκτήθηκαν σε λίγους μήνες γνώσεις που είχαν αποκτηθεί για τη Γη σε διάστημα αρκετών δεκαετιών.

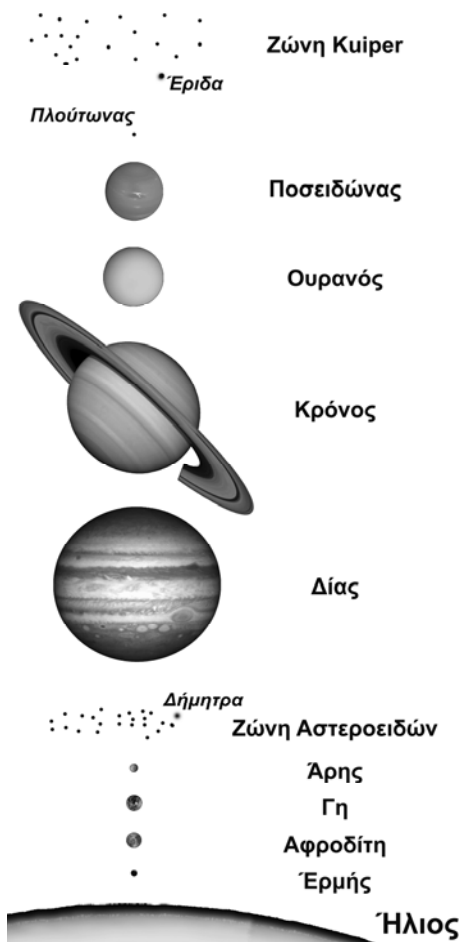
1.5 Η Γη, το Ηλιακό Σύστημα και το Σύμπαν

Η Γη είναι πλανήτης και ανήκει στο ηλιακό σύστημα. Το ηλιακό μας σύστημα αποτελείται από τον Ήλιο, τους πλανήτες και τους δορυφόρους τους, τους αστεροειδείς, τους κομήτες και τους μετεωρίτες.

Ο Ήλιος είναι απλώς ένα άστρο του Γαλαξία μας, που περιλαμβάνει, πιθανώς, περισσότερα από 10^{11} άστρα και έχει διάμετρο 70000 έτη φωτός ($1 \text{ έτος φωτός} = 10^{13} \text{ km}$). Πέρα από το γαλαξία αυτόν υπάρχει μεγάλος αριθμός από άλλα συστήματα άστρων, που λέγονται νεφελώματα και είναι του ίδιου περίπου μεγέθους. Αυτά κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα στο χώρο. Το κοντινότερο σε εμάς είναι το νεφέλωμα της Ανδρομέδας, που βρίσκεται σε απόσταση 10^6 ετών φωτός από τη Γη.

Η φασματοσκοπική ανάλυση του φωτός δείχνει ότι τα νεφελώματα απομακρύνονται με ταχύτητες ανάλογες περίπου με τις αποστάσεις τους. Αυτό δείχνει την εικόνα ενός **επεκτεινόμενου σύμπαντος**. Η θεωρία του επεκτεινόμενου σύμπαντος επιτρέπει την υπόθεση ότι αυτό βρίσκεται σε εξέλιξη και ότι κάποτε βρισκόταν 'συμπιεσμένο' σε μία πολύ μικρή περιοχή. Υποθέτοντας ότι οι ταχύτητες παρέμειναν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της επέκτασης του σύμπαντος, μπορούμε να υπολογίσουμε το χρόνο από την εποχή που το σύμπαν ήταν συγκεντρωμένο σε ένα 'σημείο'. Ο χρόνος αυτός είναι της τάξης των 13.7 δισεκατομμυρίων ετών, ενώ η ηλικία του δικού μας πλανητικού μας συστήματος, όπως βρέθηκε με την εφαρμογή των μεθόδων ραδιοχρονολόγησης σε δείγματα μετεωριτών, είναι ίση με 4.6 δισεκατομμύρια έτη, όπως και αυτή της Γης.

Οι έρευνες του Κέπλερ (1571-1630) έδειξαν ότι οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο, διαγράφοντας ελλειπτικές τροχιές που βρίσκονται στο ίδιο σχεδόν επίπεδο και έχουν τη μία τους εστία στη θέση του Ήλιου. Καθένας πλανήτης περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του κατά την ίδια φορά κατά την οποία περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο, εκτός από την Αφροδίτη και τον Ουρανό που περιστρέφονται με ανάστροφη φορά. Οι περισσότεροι από τους πλανήτες έχουν δορυφόρους, που περιστρέφονται γύρω από τους άξονές τους κατά την ίδια φορά κατά την οποία περιφέρονται οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο. Οι πλανήτες διακρίνονται στους εσωτερικούς ή γεώδεις (terrestrial) που είναι σχετικά μικροί (Ερμής, Αφροδίτη, Γη, Άρης) και στους εξωτερικούς (Δίας, Κρόνος, Ουρανός, Ποσειδώνας), οι οποίοι είναι σχετικά μεγάλοι (σχ. 1.2). Ο πίνακας (1.1) παρουσιάζει ορισμένες βασικές πληροφορίες για τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, όπως τις μέσες αποστάσεις των πλανητών από τον Ήλιο σε Αστρονομικές Μονάδες (Astronomical Units-A.U.) όπου 1 A.U. είναι η μέση απόσταση Γης-Ήλιου, περίπου 149580000 χιλιόμετρα, τις μέσες ακτίνες των



Σχήμα 1.2. Το ηλιακό μας σύστημα.

πλανητών όταν η ακτίνα της Γης θεωρηθεί ως μέτρο αναφοράς (μέση ακτίνα Γης: 6371.2 km), τις μάζες τους, τις μέσες πυκνότητές τους σε gr/cm^3 , τις περιόδους ιδιοπεριστροφής τους (σε ημέρες), τις περιόδους της περιφοράς τους γύρω από τον Ήλιο και τον αριθμό των δορυφόρων τους.

Στο σχήμα (1.2) εκτός από τους πλανήτες παρουσιάζονται ακόμα οι ακόλουθες τρεις περιοχές ενδιαφέροντος:

- α) Η **ζώνη αστεροειδών**, η οποία βρίσκεται μεταξύ του Άρη και του Δία (2-4 Α.Υ. από τον Ήλιο). Ο πρώτος και μεγαλύτερος αστεροειδής της ζώνης ονομάζεται Δήμητρα (ακτίνα 466km) και ανακαλύφθηκε το 1801, θεωρήθηκε δε

Πίνακας 1.1. Βασικές πληροφορίες για τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος.

Πλανήτης	Μέση Απόσταση από Ήλιο (Α.Υ.)	Μέση Ακτίνα (Ακτίνες Γης)	Μάζα (kg)	Πυκνότητα (gr/cm ³)	Περίοδος Περιστροφής (Ημέρες)	Περίοδος Περιφοράς (Ετη)	Δορυφόροι
Ερμής	0.39	0.38	3.30×10^{23}	5.43	58.65	0.24	Όχι
Αφροδίτη	0.72	0.95	4.87×10^{24}	5.24	-243.00*	0.62	Όχι
Γή	1.00	1.00	5.97×10^{24}	5.52	1.00	1.00	1
Άρης	1.52	0.53	6.42×10^{23}	3.94	1.03	1.88	2
Δίας	5.20	11.21	1.90×10^{27}	1.33	0.41	11.86	62
Κρόνος	9.54	9.45	5.69×10^{26}	0.70	0.44	29.40	60
Ουρανός	19.19	4.01	8.68×10^{25}	1.30	-0.72*	84.02	27
Ποσειδώνας	30.07	3.88	1.02×10^{26}	1.76	0.67	164.79	13

* Το αρνητικό πρόσημο αντιστοιχεί σε ανάστροφη περιστροφή σε σχέση με την τροχιά γύρω από τον Ήλιο

ως ανεξάρτητος πλανήτης ως το 1860. Σήμερα ξέρουμε ότι η ζώνη περιλαμβάνει πάνω από 26 αστεροειδείς με διάμετρο >200km και πιθανότατα πάνω από 1 εκατομμύριο αστεροειδείς με διάμετρο >1km. Αυτοί έχουν συχνά ιδιαίτερα ακανόνιστο σχήμα και ορισμένες φορές εξαιρετικά ελλειπτικές τροχιές, φτάνοντας μακρύτερα και από τον Ποσειδώνα. Μερικοί απ' αυτούς έχουν ελλειπτικές τροχιές που φτάνουν μέχρι τη Γη και ονομάζονται NEA (Near Earth Asteroids) ή ομάδα του Απόλλωνα. Αυτοί παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί είναι οι περισσότεροι μελετημένοι αστεροειδείς και κυρίως επειδή οι μετεωρίτες που πέφτουν στη Γη είναι NEA που συλλαμβάνονται από το βαρυτικό πεδίο της.

- β) Ο **Πλούτωνας**, ο οποίος δεν θεωρείται πλανήτης από το 2006, αφού σύμφωνα με την Διεθνή Αστρονομική Ένωση (IAU) δεν έχει τροχιά «καθαρή» από άλλα αντικείμενα και κυρίως πλανήτες. Πράγματι, αν και βρίσκεται σε μέση απόσταση περίπου 39.5 Α.Υ. από τον Ήλιο, δηλαδή μετά τον Ποσειδώνα, η τροχιά του Πλούτωνα είναι τόσο ελλειπτική που στο περιήλιο (πλησιέστερο σημείο στον Ήλιο) βρίσκεται πιο κοντά στον Ήλιο από ότι ο Ποσειδώνας.

γ) Η **ζώνη Kuiper**, η ύπαρξη της οποίας προτάθηκε από τον G. Kuiper το 1951 αν και η πρώτη παρατήρηση αντικειμένων στη ζώνη αυτή έγινε το 1992. Αποτελείται από εκατοντάδες εκατομμύρια μικρά σώματα κυρίως πάγου (παγωμένο μεθάνιο). Το πιο μεγάλο από αυτά ανακαλύφθηκε το 2005 και ονομάζεται Έριδα, έχει ακτίνα περίπου 1200km, είναι δηλαδή περίπου 30% μεγαλύτερο από τον Πλούτωνα και για το λόγο αυτό αρχικά θεωρήθηκε ως ο 10^{ος} πλανήτης. Η ζώνη Kuiper θεωρείται ως η βασική πηγή κομητών μικρής περιόδου (περίοδος κάτω από 200 έτη), αφού πιστεύεται ότι βαρυτικές διαταραχές από άλλους πλανήτες αποσπούν αντικείμενα από τη ζώνη αυτή και τα βάζουν σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο.

Σήμερα, σώματα όπως η Δήμητρα, ο Πλούτωνα και η Έριδα ονομάζονται **πλανήτες νάνοι (dwarf planets)**. Επίσης, θεωρείται πιθανό ότι ο Πλούτωνα προέρχεται από τη ζώνη Kuiper λόγω βαρυτικής διαταραχής (έλξης από άλλο πλανήτη, πιθανότατα τον Ποσειδώνα). Σήμερα γνωρίζουμε άλλα εννέα μικρά σώματα (Κένταυροι) τα οποία πιθανότατα έχουν διαφύγει από τη ζώνη Kuiper και έχουν τροχίες μεταξύ Δία και Ποσειδώνα

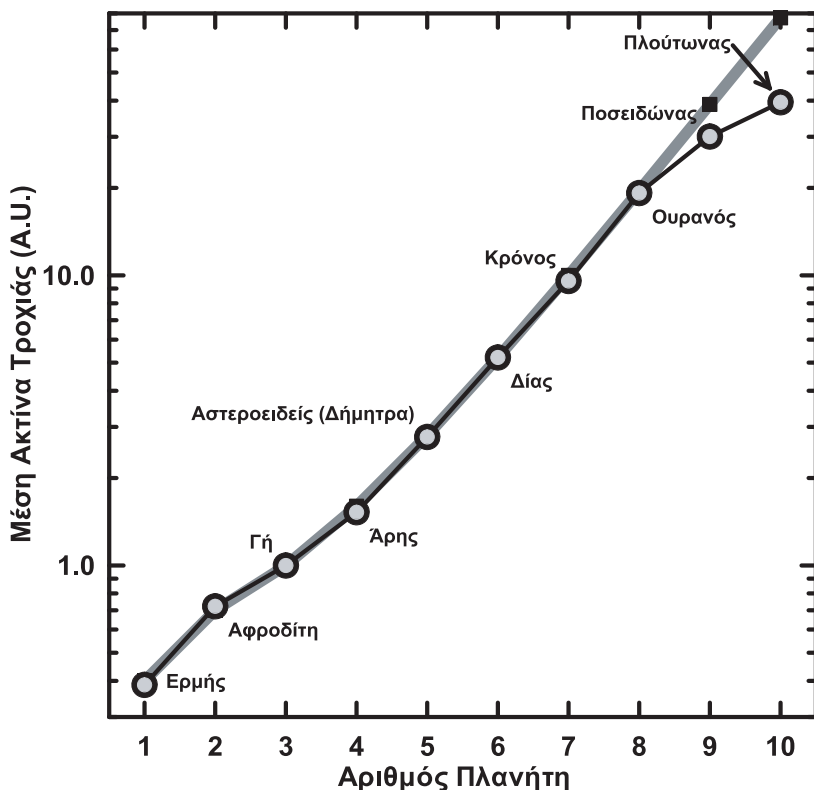
Σύμφωνα με μια άλλη άποψη, ο Πλούτωνα, όπως και ο Τρίτωνα (μεγαλύτερος δορυφόρος του Ποσειδώνα), ανήκουν στην κατηγορία των αντικειμένων που περιφέρονταν αρχικά γύρω από τον Ήλιο και απωθήμένα από τον ισχυρό ηλιακό άνεμο των πρώτων σταδίων ζωής του Ήλιου μας σήμερα βρίσκονται στο **νέφος του Oort**. Το νέφος αυτό, που προτάθηκε από τον J. Oort το 1950, θεωρείται ότι είναι ένα τεράστιο σφαιρικό νέφος από δισεκατομμύρια σώματα, περίπου σε απόσταση έως και 200.000 A.U. από τον Ήλιο, αποτελεί δε το πιθανό όριο του πλανητικού μας συστήματος όπου η επίδραση του Ήλιου εξαφανίζεται. Περαιστικοί αστέρες στέλνουν (λόγω βαρυτικών διαταραχών) τα παγωμένα σώματα του νέφους του Oort είτε στο μακρινό διάστημα είτε προς τον Ήλιο ως κομήτες μακράς περιόδου. Το πιο μακρινό αντικείμενο που έχει παρατηρηθεί και γνωρίζουμε σήμερα στο ηλιακό μας σύστημα, η Σέντνα σε απόσταση 90A.U. με διάμετρο περίπου 900km, θεωρείται από τα εσωτερικότερα αντικείμενα του νέφους του Oort.

Οι αποστάσεις των πλανητών από τον Ήλιο παρουσιάζουν μία ιδιαίτερη κανονικότητα. Αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα (1.3), όπου η απόσταση του κάθε πλανήτη είναι χαρτογραφημένη ως συνάρτηση του αριθμού του πλανήτη. Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως σχέση Titius-Bode και η μέση ακτίνα τροχιάς, r_k , δίνεται (σε A.U.) προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$r_k = 0.4 + 0.3 \times 2^k \quad (1.1)$$

όπου το k παίρνει τιμή $-\infty$ για τον Ερμή και ακέραιες τιμές (0, 1, 2, κλπ.) για τους υπόλοιπους πλανήτες.

Η σχέση (1.1) παρουσιάζεται με γκριζα γραμμή στο σχήμα (1.3) ενώ τα πραγματικά στοιχεία παρουσιάζονται με κύκλους και συνεχόμενη μαύρη γραμμή. Η σχέση Titius-Bode ισχύει μόνο αν η ζώνη των αστεροειδών θεωρηθεί ως ένας ανεξάρτητος πλανήτης ενώ η πρώτη, ιστορικά, απόκλιση από τον νόμο παρατηρήθηκε με την ανακάλυψη του Ποσειδώνα, αφού η αναμενόμενη του θέση από το νόμο Titius-Bode είναι εκεί που βρίσκεται ο Πλούτωνας. Αν και η σημασία της σχέσης αυτής είναι έντονα αμφισβητούμενη, με ορισμένους αστρονόμους να προτείνουν ότι πρόκειται για μία σχέση χωρίς καμία θεωρητική σημασία και αποτέλεσμα στατιστικής σύμπτωσης, πολλές προσπάθειες έχουν γίνει με στόχο τη θεωρητική ερμηνεία της σχέσης, σε ότι αφορά τον τρόπο δημιουργίας των πλανητών μέσα στο πρωταρχικό ηλιακό σύστημα.



Σχήμα 1.3. Μέση ακτίνα τροχιάς πλανητών γύρω από τον Ήλιο σε συνάρτηση με τον αριθμό του πλανήτη. Η σχέση Titius-Bode φαίνεται επίσης με γκριζα γραμμή.

1.5.1 Οι γεώδεις πλανήτες και η Σελήνη

Οι **γεώδεις πλανήτες**, κατά σειρά αποστάσεων από τον Ήλιο, είναι ο Ερμής, η Αφροδίτη και ο Άρης. Αυτοί είναι μικροί πλανήτες και μαζί με τη Γη αποτελούν τους εσωτερικούς πλανήτες του πλανητικού μας συστήματος. Η Αφροδίτη είναι η μεγαλύτερη και ο Ερμής ο μικρότερος από τους τρεις αυτούς πλανήτες.

Η **Αφροδίτη** είναι παρόμοια με τη Γη ως προς το μέγεθος και την πυκνότητά της. Έχει πιθανώς πυρήνα συγκρίσιμο με της Γης. Δεν έχει μαγνητικό πεδίο του οποίου η γένεση να οφείλεται σε φυσική διαδικασία του εσωτερικού της (όπως συμβαίνει στη Γη) και γι' αυτό δεν είναι πιθανό να έχει υγρό πυρήνα. Έχει ατμόσφαιρα η οποία είναι 90 φορές πυκνότερη από της Γης και αποτελείται κατά κύριο λόγο από CO_2 αλλά δεν περιέχει νερό. Η έλλειψη νερού στην επιφάνεια της Αφροδίτης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτή δεν έχει ασθenoσφαιρικό στρώμα, όπως συμβαίνει στη Γη όπου η κυκλοφορία του νερού, μέσω των λιθοσφαιρικών καταδύσεων και της ηφαιστειότητας, αποτελεί βασικό παράγοντα για τη δημιουργία της ασθενόσφαιρας. Η Αφροδίτη δεν έχει δορυφόρους είναι όμως ο μόνος πλανήτης που παρουσιάζει ηφαιστειακή δραστηριότητα παρόμοια με της Γης, ενδεικτική της παρόμοιας διαδικασίας γένεσης μάγματος. Να σημειωθεί ότι μόνο η Ηώ (δορυφόρος του Δία) και ο Τρίτωνας έχουν επίσης ενεργή ηφαιστειακή δραστηριότητα, αν και αρκετά διαφορετικού τύπου (σχ. 1.4).

Ο **Άρης** έχει μικρότερη πυκνότητα από τη Γη αλλά ο συντελεστής της ροπής αδράνειας του ($I = 0.365 \text{MR}^2$) είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή για τη Γη ($I = 0.3307 \text{MR}^2$) που σημαίνει ότι ο πυρήνας του είναι σχετικά μικρός. Το κοκκινωπό χρώμα του οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα των επιφανειακών πετρωμάτων του σε οξείδια σιδήρου, που δείχνει σύσταση παρόμοια με αυτή της Γης αλλά με εντονότερη οξείδωση. Έχει ασθενή μαγνήτιση που οφείλεται στον παχύ και έντονα μαγνητισμένο φλοιό. Υπήρξε στο παρελθόν έντονη ηφαιστειακή δράση στον Άρη αλλά δεν υπάρχουν ενδείξεις για ηφαιστειακή δράση σήμερα. Έχει πολύ αραιή ατμόσφαιρα που περιλαμβάνει N_2 και CO_2 , καθώς και λίγο νερό. Η ατμόσφαιρα του δεν περιέχει οξυγόνο. Ο Άρης έχει δύο μικρούς δορυφόρους, τον Φόβο και τον Δείμο.

Ο **Ερμής** είναι ο μικρότερος από τους εσωτερικούς πλανήτες και έχει υψηλή πυκνότητα η οποία είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την πίεση γιατί η αυτοσυμπίεση είναι μικρή στον Ερμή λόγω της σχετικά μικρής του μάζας. Η ακτίνα του πυρήνα του είναι 80% της συνολικής ακτίνας του πλανήτη. Αυτό σημαίνει ότι το πάχος του μανδύα είναι πολύ μικρό ($\sim 500 \text{km}$) με συνέπεια να υπήρξε γρήγορη ψύξη και πρόωρη παύση της δράσης ρευμάτων μεταφοράς και τεκτονικής δράσης. Έχει ασθενές μαγνητικό πεδίο το οποίο πιθανώς επάγεται στον πλανήτη



Σχήμα 1.4. Τεράστια ηφαιστειακή έκρηξη (ύψος~300 km) πιθανότατα λειωμένου θείου στην Ηώ (ηφαίστειο Tvashtar, 28/2/2007, 11:04 GMT, πηγή NASA).

από τον ηλιακό άνεμο και πιθανώς πολύ λίγη ατμόσφαιρα ενώ δεν έχει κανένα δορυφόρο.

Η Γη έχει διακεκριμένες σημαντικές ιδιότητες που τη χαρακτηρίζουν και τη διαφοροποιούν από τους άλλους τρεις εσωτερικούς πλανήτες. Έτσι, είναι ο μόνος πλανήτης που έχει άφθονο επιφανειακό νερό και ατμόσφαιρα πλούσια σε οξυγόνο, περιλαμβάνει ευρείες ηπειρωτικές ζώνες όξινων πετρωμάτων (γρανίτες, κλπ.) και έχει τοπογραφία δύο διακεκριμένων κατηγοριών (ηπειρωτικές, θαλάσσιες). Επίσης, είναι ο μόνος από τους εσωτερικούς πλανήτες που έχει έντονο μαγνητικό πεδίο και που συνοδεύεται από ένα μεγάλο δορυφόρο (τη Σελήνη).

Η Σελήνη έχει μάζα ίση με το 0.012 της μάζας τη Γης και ακτίνα ίση με το 0.27 της ακτίνας της Γης. Αν και η Γη είναι ένας μικρός πλανήτης, η Σελήνη ανήκει στους επτά μεγαλύτερους δορυφόρους που ξεχωρίζουν από τους 165 γνωστούς δορυφόρους του ηλιακού μας συστήματος. Μάλιστα ξεχωρίζει από τους μόλις τρεις δορυφόρους των γεωδών πλανητών, αφού οι άλλοι δύο δορυφόροι του Άρη (Φόβος και Δείμος) είναι πολύ μικροί. Η μέση πυκνότητα της είναι 3.315 gr/cm^3 και η ροπή αδράνειας της είναι σχετικώς μεγάλη ($I=0.391 \text{ Ma}^2$).

Έχει φλοιό πάχους 65 km και πυρήνα του οποίου η ακτίνα είναι το ένα δέκατο της ολικής της ακτίνας ενώ δεν έχει ατμόσφαιρα λόγω του μικρού της μεγέθους. Στη Σελήνη έχουν βρεθεί βασαλτικά πετρώματα ηλικίας μέχρι 4.2×10^9 yr.

Διάφορες απόψεις έχουν διατυπωθεί για τον τρόπο δημιουργίας της. Μεταξύ αυτών είναι η σύλληψή της από τη Γη ενώ αυτή περιφερόταν σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο και η δημιουργία της με επαύξηση από συντρίμματα τμήματος της Γης που προήλθαν από πτώση στη Γη άλλου ουράνιου σώματος.

1.5.2 Μετεωρίτες και κομήτες

Οι **μετεωρίτες** είναι σώματα από σίδηρο ή πυριτικό υλικό (λίθους) που φθάνουν στη Γη αφού διαγράψουν τροχιές γύρω από τον ήλιο όπως οι πλανήτες. Αν και για λίγους έχουμε ακριβείς παρατηρήσεις της τροχιάς τους, η πλειονότητά τους προέρχεται από τη ζώνη των αστεροειδών και κυρίως την προαναφερθείσα ομάδα αστεροειδών του Απόλλωνα (Near Earth Asteroids). Σχετικά λίγοι μετεωρίτες έχει διαπιστωθεί ότι προέρχονται από τη Σελήνη και τον Άρη. Οι μετεωρίτες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν το πρωτογενές υλικό του ηλιακού συστήματος από το οποίο φτιάχτηκαν οι πλανήτες και για το λόγο αυτό παρέχουν σημαντικές πληροφορίες, αφού έχουν φτάσει στη Γη πρακτικά χωρίς να «μολυνθούν» από γήινα υλικά. Αν και αρκετές εκατοντάδες τόνων μετεωρίτες φτάνουν στη Γη κάθε μέρα, οι πιο πολλοί καίγονται στην γήινη ατμόσφαιρα κατά την πτώση τους δημιουργώντας εντυπωσιακές εικόνες φωτεινών αστεριών που κινούνται. Τελικά, λίγοι από αυτούς φτάνουν στη Γη, με το μεγαλύτερο που έχει βρεθεί να έχει βάρος 60 τόνων και όγκο 6.5 m^3 (μετεωρίτης Χόμπα, Ναμίμπια). Οι πιο μεγάλοι φτιάχνουν κρατήρες φτάνοντας στη Γη (περίπου 120 κρατήρες μέχρι σήμερα), όπως ο διάσημος κρατήρας Barringer στην Αριζόνα των ΗΠΑ, διαμέτρου 1200 m, ο οποίος σχηματίστηκε πριν από ~50000 χρόνια. Ορισμένοι, αν και μεγάλοι, διαλύονται πριν φτάσουν στη Γη, όπως ο μετεωρίτης Tunguska που έπεσε το 1908 στη δυτική Σιβηρία, ο οποίος διέλυσε δέντρα σε ακτίνα 50 χιλιομέτρων και ακούστηκε ως εκκωφαντικός ήχος στο μισό πλανήτη, μέχρι και το Λονδίνο! Η συλλογή των μετεωριτών έχει εμπλουτιστεί εξαιρετικά από την ανακάλυψη περιοχών της Ανταρκτικής με χιλιάδες μετεωρίτες οι οποίοι θάφτηκαν στο χιόνι και σήμερα εμφανίζονται στην επιφάνεια λόγω εξάχνωσης του χιονιού.

Οι μετεωρίτες αποτελούνται από μίγματα σιδήρου-νικελίου ή/και από κρυσταλλικά πυριτικά υλικά, κυρίως ολιβίνη ή πυρόξενο αλλά και από χαλαζία. Διακρίνονται σε:

- α) **σιδηρομετεωρίτες** που αποτελούνται κατά 98% από μέταλλα (κυρίως σίδηρο),
- β) **σιδηρολιθομετεωρίτες** που αποτελούνται περίπου κατά 50% από μέταλλα και κατά 50% από πυριτικά υλικά,
- γ) **λιθομετεωρίτες** που περιέχουν χόνδρους (σφαιροειδή τεμάχια) και λέγονται **χονδρίτες** ή δεν περιέχουν χόνδρους και λέγονται **αχονδρίτες** και
- δ) **τεκτίτες** που είναι υαλώδεις γιατί αποτελούνται κατά 70% από χαλαζία.

Οι **σιδηρομετεωρίτες** αποτελούνται από ένα κράμα περίπου 85-95% σιδήρου και 5-13% νικελίου, ορισμένες φορές με άλλα κυρίως πυριτικά υλικά. Η συνειδητοποίηση ότι ο σίδηρος είναι ένα υλικό άφθονο στο ηλιακό μας σύστημα τον κατέστησε το βασικό υποψήφιο υλικό για τον πυκνό πυρήνα της Γης, όταν αυτός ανακαλύφθηκε και προσδιορίστηκε η πυκνότητά του. Αυτός είναι ακόμα ένας βασικός λόγος του ενδιαφέροντός μας για τους σιδηρομετεωρίτες. Συχνά εμφανίζονται με περισσότερο ή λιγότερο πυριτικό υλικό (**σιδηρολιθομετεωρίτες**) ενώ ο σίδηρος εμφανίζεται με δύο μορφές (καμασίτης και ταενίτης), που συχνά εμφανίζονται μαζί.

Από τους **λιθομετεωρίτες** οι **χονδρίτες** παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον γιατί δεν βρέθηκαν σε γήινα πετρώματα και γι' αυτό θεωρούνται ότι είναι αποτέλεσμα ενός αρχικού σταδίου κατά την εξέλιξη του υλικού από το οποίο σχηματίστηκαν οι γεώδεις πλανήτες. Χαρακτηριστικό τους είναι η παρουσία χόνδρων (chondrules) δηλαδή σφαιροειδών σωμάτων λιωμένου πυριτικού υλικού υαλώδους μορφής με μέγεθος μερικών χιλιοστών. Η μακροσκοπική μορφή των μετεωριτών αυτών, οι οποίοι είναι οι πιο διαδεδομένοι, δεν μοιάζει με κανένα υλικό της Γης και θεωρείται ότι αποτελούν το βασικό υλικό του πρωταρχικού μανδύα των πλανητών αλλά και του φλοιού ο οποίος προέρχεται εξελικτικά από το μανδύα. Οι πιο πολλοί μετεωρίτες προέρχονται από τη ζώνη των αστεροειδών. Οι χόνδροι θεωρούνται ότι αντιστοιχούν σε υλικό που έλιωσε λόγω θέρμανσης μέσα στο ηλιακό νεφέλωμα.

Οι **αχονδρίτες** έχουν υποστεί πλήρη κρυστάλλωση, όπως τα πυριγενή γήινα πετρώματα και έχουν σύσταση παρόμοια με τη σημερινή του μανδύα της Γης. Η πλειονότητα των χονδριτών και πολλοί αχονδρίτες έχουν ηλικία κρυστάλλωσης 4.6×10^9 έτη, που είναι και η ηλικία του ηλιακού μας συστήματος. Λίγοι αχονδρίτες είναι νεώτεροι, εμφανίζοντας εξελικτικά στοιχεία τα οποία είναι χαρακτηριστικά πλανητών και όχι αστεροειδών. Μερικοί προέρχονται από τη Σελήνη (πιθανότατα αποσπασμένοι από πτώση άλλων μετεωριτών) ενώ μία αρκετά μεγάλη ομάδα έχει στοιχεία που δείχνουν εμφανή προέλευση από τον Άρη (ομάδα μετεωριτών SNC).

Οι **τεκτίτες** είναι μικρά σφαιρικά κομμάτια πυριτικού υλικού, κυρίως γυαλιού,

με διάσταση συνήθως μερικών εκατοστών, τα οποία έχουν βρεθεί κατά χιλιάδες σε διάφορες ηπείρους. Η χρονολόγηση έδειξε διακριτές ομάδες 0.7 εκατομμυρίων ετών (Αυστραλία και ΝΑ. Ασία), 1 εκατομμυρίου ετών (Δ. Αφρική), 14 εκατομμυρίων ετών (Ευρώπη), κλπ. Σήμερα ξέρουμε ότι είναι αποτέλεσμα της σπένιας και βίαιης πτώσης γιγάντιων μετεωριτών στη Γη, με αποτέλεσμα υλικό (κυρίως ιζήματα) να εκτοξεύεται σαν μεγάλες σταγόνες έξω από την ατμόσφαιρα και το οποίο επιστρέφει (σε λιγότερο από 300 έτη) με τη μορφή των τεκτιτών. Για το λόγο αυτό αποτελούν το βασικό εργαλείο χρονολόγησης τεράστιων μετεωριτικών συγκρούσεων με τη Γη.

Οι **κομήτες** αποτελούν σύνολα ασθενώς συνδεδεμένων παγωμένων σωματιδίων τα οποία όταν βρίσκονται κοντά στον ήλιο εξατμίζονται από τον ηλιακό άνεμο και έτσι φαίνονται ως φωτοστέφανα που συχνά έχουν ουρά η οποία δείχνει πάντοτε σε κατεύθυνση αντίθετη από τον ήλιο (λόγω της φοράς του ανέμου). Είναι απομακρυσμένα μικρά τμήματα του ηλιακού συστήματος και μερικοί απ' αυτούς εισέρχονται στο εσωτερικό του συστήματος από διάφορες διευθύνσεις. Τήξη του πάγου των σωματιδίων από τον ήλιο δημιουργεί μικρούς εύθραυστους κόκκους που σχηματίζουν τους **μετεωροειδείς**, οι οποίοι όταν βρίσκονται κοντά στη Γη εισέρχονται στην ανώτερη ατμόσφαιρα, δημιουργώντας τους **διάττοντες αστέρες**.

Πληροφορίες για τη χημική σύσταση των κομητών, που έχουν προκύψει από τη φασματοσκοπική ανάλυση μετεωροειδών, δείχνουν ότι υπάρχουν κομήτες διαφόρων χημικών συστάσεων όπως συμβαίνει με τους μετεωρίτες. Θεωρείται πιθανόν ότι οι κομήτες αποτελούνται από πρωτογενές πλανητικό υλικό που εκτοξεύτηκε υπό μορφή σκόνης από το ηλιακό νεφέλωμα κατά το αρχικό στάδιο της δημιουργίας του. Πολλοί μετεωρίτες έχουν περιοδικές τροχιές γύρω από τον ήλιο με μικρή περίοδο, όπως π.χ. ο κομήτης του Halley (μέση περίοδος 76 έτη) ενώ άλλοι εμφανίζονται μόνο μία φορά και χάνονται στο διάστημα. Γενικά, η προέλευσή τους θεωρείται, όπως προαναφέρθηκε, ότι είναι είτε η ζώνη Kuiper (περιοδικοί κομήτες μικρής περιόδου) είτε το νέφος του Oort (κομήτες μακράς περιόδου).

1.5.3 Η γένεση του σύμπαντος

Ρίζες της σύγχρονης υπόθεσης για τη γένεση του σύμπαντος βρίσκονται στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Einstein, αφού ο A. Friedmann βρήκε λύση στις εξισώσεις αυτής της θεωρίας (γνωστή ως λύση Big Bang). Από τη λύση αυτή προκύπτει ότι το σύμπαν αναδύθηκε απότομα από μία κατάσταση 'μοναδικότητας' (singularity) και συνεχίζει ακόμα να επεκτείνεται. Αυτή η μοναδικότητα χα-

ρακτηριζόταν από άπειρη πυκνότητα και πίεση. Το 1927 ο Βέλγος αστρονόμος G. Lemaître θεώρησε ότι η δημιουργία του σύμπαντος άρχισε με την έκρηξη του 'κοσμικού αυγού'. Μέσα σε δύο έτη ο E. Hubble ανακοίνωσε παρατηρήσεις του στο Mount Wilson Observatory από όπου προέκυψε μετατόπιση προς το κόκκινο στο φάσμα του φωτός μακρινών γαλαξιών. Αυτό σημαίνει απομάκρυνσή τους και συνεπώς επέκταση του σύμπαντος που προέβλεψε ο Friedmann.

Η μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) πραγματοποιήθηκε πριν από περίπου 13.7 δισεκατομμύρια έτη $[(13.7 \pm 0.2) \times 10^9 \text{a}]$, οπότε η «εξόχως συμπίεσμένη μοναδικότητα» (singularity) αποτέλεσε την πηγή του χωρο-χρόνου, της ύλης και της ακτινοβολίας. Σε χρόνο ενός πολύ μικρού κλάσματος του δευτερολέπτου (που είναι γνωστός ως χρόνος Planck $\approx 5.4 \times 10^{-44} \text{sec}$) μετά τη Μεγάλη Έκρηξη η θερμοκρασία του σύμπαντος απέκτησε τεράστια τιμή ($\sim 10^{32} \text{K}$). Στη συνέχεια άρχισε να επεκτείνεται και να ψύχεται η ύλη και η ακτινοβολία και σε χρόνο μόλις 10^{-5}sec μετά τη Μεγάλη Έκρηξη η ύλη ψύχθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό και έγινε δυνατός ο σχηματισμός φωτονίων, ηλεκτρονίων, νετρίνων και μερικών πρωτονίων και νετρονίων. Σε χρόνο λίγων λεπτών η θερμοκρασία έγινε 10^9K οπότε σχηματίστηκαν οι πυρήνες του υδρογόνου και του ηλίου. Μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος αρκετών εκατομμυρίων ετών η θερμοκρασία απέκτησε τιμή της τάξης μερικών χιλιάδων βαθμών και έτσι τα ηλεκτρόνια και οι πυρήνες των ατόμων των στοιχείων (κυρίως του υδρογόνου και του ηλίου) δεν είχαν πια αρκετή ενέργεια ώστε να υπερνικηθεί η μεταξύ τους ηλεκτρομαγνητική έλξη και γι' αυτό πλησίασαν και σχημάτισαν τα πρώτα ηλεκτρικώς ουδέτερα άτομα.

Μετά από ένα δισεκατομμύριο έτη περίπου το σύμπαν έπαψε να εξελίσσεται με τον αρχικό φρενήρη ρυθμό και άρχισε να ηρεμεί. Τότε τα ηλεκτρικώς ουδέτερα άτομα άρχισαν να κινούνται τυχαία. Μερικά αέρια άρχισαν να στροβιλίζονται σε περιοχές μεγαλύτερης πυκνότητας και οι περιοχές μεγαλύτερης πυκνότητας να συστέλλονται για να σχηματίσουν πρωτογαλαξίες οι οποίοι συμπίεστηκαν παραπέρα για να δημιουργήσουν γαλαξίες. Αργότερα τα πρώτα άστρα άρχισαν να σχηματίζονται μέσα στους γαλαξίες και όταν τα αέρια στα άστρα αυτά συμπίεστηκαν επαρκώς άρχισαν σε αυτά θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που είχαν ως συνέπεια την καύση και την εκπομπή φωτός. Μετά από αρκετό χρόνο άρχισε ο σχηματισμός των πρώτων πλανητών.

1.5.4 Η γένεση του ηλιακού συστήματος

Η Γη δημιουργήθηκε κατά τη διαδικασία σχηματισμού και των άλλων πλανητών του ηλιακού μας συστήματος. Για τη γένεση του ηλιακού συστήματος έχουν γίνει διάφορες υποθέσεις. Οποιαδήποτε υπόθεση σχετικά με τη γένεση του ηλια-

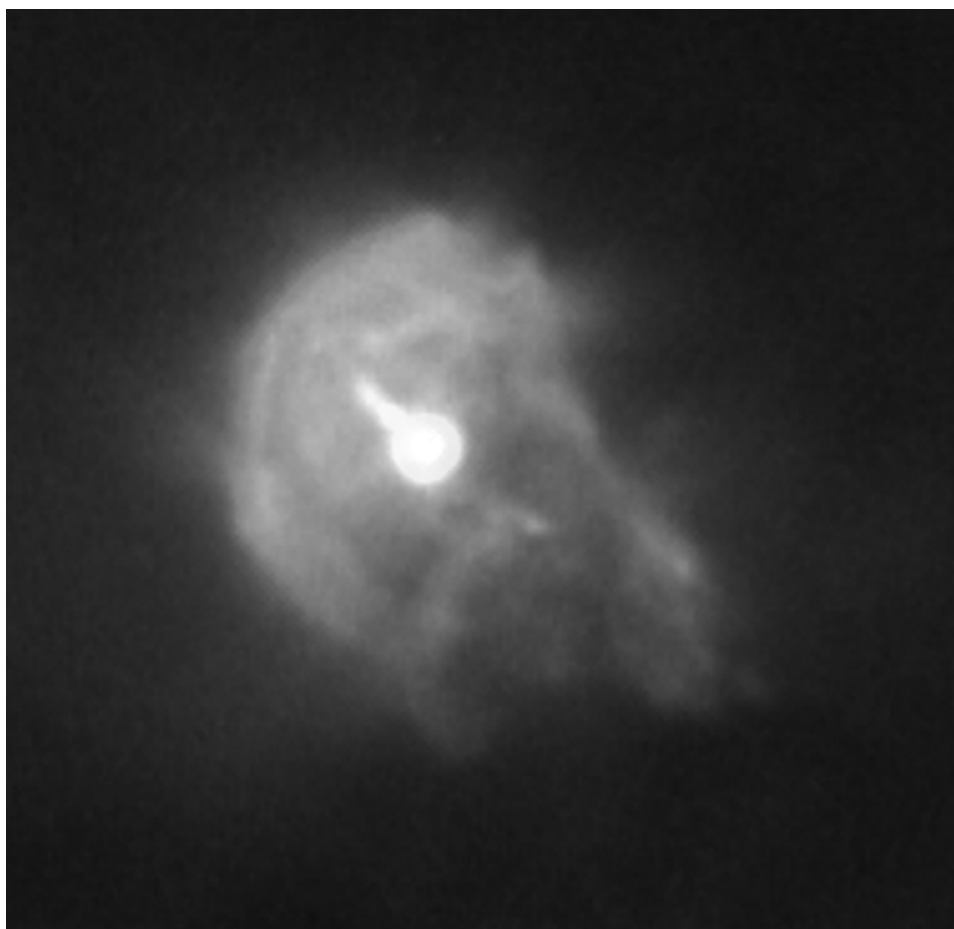
κού συστήματος πρέπει να βασίζεται στις ιδιότητες του, που μνημονεύθηκαν παραπάνω, όπως είναι ο τρόπος κίνησης των πλανητών, ο τρόπος κατανομής της μάζας και της στροφορμής του ηλιακού συστήματος, κλπ.

Υπάρχουν δύο σχολές που υποστηρίζουν διαφορετικές απόψεις για τη γένεση του ηλιακού συστήματος. Και οι δύο, όμως, δέχονται ότι το ηλιακό σύστημα προήλθε από έναν προγονικό ήλιο ή από ένα προγονικό ηλιακό νεφέλωμα.

Η **πρώτη σχολή** δέχεται ότι ο σχηματισμός των πλανητών οφείλεται στην επενέργεια πάνω στο προγονικό ηλιακό νεφέλωμα εξωτερικής δύναμης. Η βασική άποψη της σχολής αυτής, την οποία διατύπωσε αρχικά ο Buffon το 1749 και ενίσχυσαν αργότερα οι Chamberlin–Moulton και Jeans–Jeffreys, είναι ότι οι πλανήτες σχηματίστηκαν από ορισμένη μάζα που αποσπάστηκε από τον ήλιο, επειδή συγκρούστηκαν με τον ήλιο τεράστιοι κομήτες ή ένα άλλο άστρο ή επειδή πέρασε κοντά του ένα άστρο, το οποίο μετά απομακρύνθηκε. Η υπόθεση αυτή υποστηριζόταν επί πολύ χρόνο. Δείχθηκε, όμως, ότι είναι αδύνατο η ύλη, που τυχόν αποσπάστηκε από τον ήλιο κατά τέτοιο τρόπο, να συμπυκνώθηκε και να σχημάτισε τους πλανήτες, γιατί αυτή η μάζα θα διασκορπιζόταν στο διάστημα σε πολύ μικρό χρόνο.

Η **δεύτερη σχολή** απορρίπτει την ιδέα του σχηματισμού των πλανητών με την επίδραση εξωτερικού αιτίου και δέχεται ότι η ενέργεια της δημιουργίας των πλανητών υπήρχε στο προγονικό ηλιακό νεφέλωμα (solar nebula). Κατά τους Kant (1755) και Laplace (1796) ο προγονικός Ήλιος ήταν μία αραιά, περιστρεφόμενη μάζα αερίων που καταλάμβανε ολόκληρο τον όγκο που καταλαμβάνουν ο Ήλιος και οι πλανήτες. Κάποια εξωτερική διαταραχή, πιθανότατα μια έκρηξη υπερκαινοφανούς (supernova), διατάραξε το νέφος το οποίο έγινε ασταθές και άρχισε να καταρρέει στο κέντρο του. Η συστολή του αερίου νεφελώματος το οποίο πραγματοποιούσε μία έστω μικρή αρχική περιστροφική κίνηση (όπως παρατηρούμε σήμερα και σε άλλους γαλαξίες) είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας, για λόγους διατήρησης της στροφορμής. Στο κέντρο δημιουργείται ο **πρωτοαστέρας**, ο οποίος απορροφά τις γειτονικές αέριες μάζες, όμως η φυγόκεντρος δύναμη επιτρέπει σε ένα τμήμα τους να ξεφύγουν και να περιστρέφονται μαζί με τον πρωτοαστέρα, συσπείρουμενες σε ένα δίσκο ο οποίος καλείται **πρωτοπλανητικός δίσκος (protoplanetary disk)**. Το όλο σύστημα περιστρέφεται και ακτινοβολεί ενέργεια, οπότε σταδιακά ψύχεται.

Είναι ενδιαφέρον να επισημανθεί ότι πρόσφατες παρατηρήσεις από το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble έδειξαν την ύπαρξη όχι μόνο περιοχών όπου πιστεύεται ότι γεννιούνται νέοι αστέρες, γνωστών ως νεφελώματα (nebula) αλλά και πολλών μεμονωμένων νέων αστέρων με εμφανείς πρωτοπλανητικούς δίσκους, όπως αυτός που φαίνεται στο σχήμα (1.5).



Σχήμα 1.5. Νέος αστέρας και πρωτοπλανητικός δίσκος στο νεφέλωμα του Ορίωνα (Orion nebula), όπως παρατηρήθηκε από το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble (πηγή NASA).

Σήμερα, πιστεύεται ότι στο σημείο αυτό υπάρχουν δύο εναλλακτικά στάδια εξέλιξης που μπορεί να ακολουθήσει ο πρωτοπλανητικός δίσκος, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν:

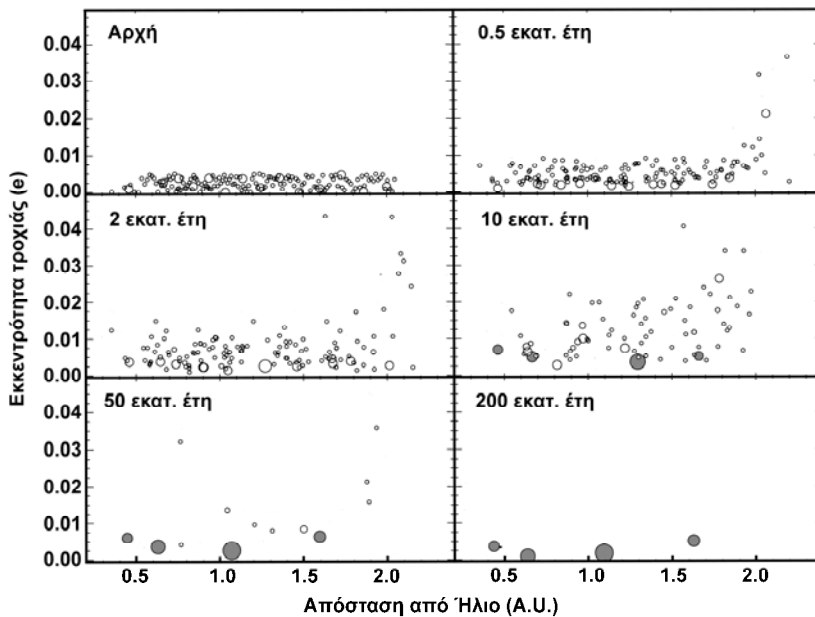
- α) Το αέριο που περιστρέφεται γίνεται και αυτό ασταθές, καταρρέει, συσσωματώνεται και σχηματίζει ένα δεύτερο αστέρα (διπλός αστέρας),
- β) Το νέφος ψύχεται και αρχικά τα μεταλλικά και μετά τα πυριτικά υλικά μετατρέπονται σε σκόνη. Σε μεγάλες αποστάσεις από τον πρωτοαστέρα ψύχεται και το νερό-πάγος ή και άλλοι πάγοι (π.χ. μεθανίου). Η σκόνη αυτή με διαδικασία συγκρούσεων δημιουργεί μικροσκοπικούς κόκκους, οι οποίοι συχνά

λιώνουν και κρύνουν κάτω από την επίδραση του πρωτοαστέρα, σχηματίζοντας τους υαλώδεις χόνδρους που σήμερα βλέπουμε στους χονδριτικούς μετεωρίτες.

Στο στάδιο αυτό το βασικό μοντέλο γένεσης πλανητών είναι αυτό της **επαύξησης (accretion)**. Στο μοντέλο αυτό η σκόνη συσσωματώνεται, με συγκρούσεις σε σώματα με μέγεθος περίπου 1 km, που αποκαλούνται **πλανητοειδείς**. Αυτοί βρίσκονται σε αποστάσεις περίπου 1-2 A.U. από τον πρωτοήλιο, με τους μεγαλύτερους πλανητοειδείς να δημιουργούνται πιο μακριά από τον πρωτοήλιο. Σε αυτή τη διάσταση, η βαρυτική δύναμη των πλανητοειδών επιτρέπει την έλξη γειτονικών σωμάτων και την αύξησή τους με συγκρούσεις, η οποία ακολουθεί νόμο δύναμης, ανάλογο περίπου του $\sim R^2 - R^4$, όπου R η ακτίνα του πλανητοειδούς (de Pater and Lissauer, 2001). Αυτή η **εκθετική αύξηση (runaway growth)** δημιουργεί τους πρώτους **πλανήτες-έμβρυα (planetary-embryos)**. Το αποτέλεσμα είναι αυτοί οι πλανήτες-έμβρυα, λόγω της ισχυρής βαρυτικής επίδρασής τους, να ανταγωνίζονται έντονα και συχνά να «απορροφούν» όλα τα γειτονικά πλανητοειδή, δημιουργώντας συνθήκες για την ανάπτυξη μόνο ορισμένων πλανητών-εμβρύων, κατάσταση γνωστή ως **ολιγαρχική αύξηση (oligarchic growth)**.

Η μετέπειτα εξέλιξη είναι διαφορετική για τους εσωτερικούς και εξωτερικούς πλανήτες-έμβρυα. Μέσα σε 1-10 εκατομμύρια έτη ο πρωτοήλιος έχει γίνει κανονικός αστέρας και δημιουργεί ισχυρό ηλιακό άνεμο. Οι μεγαλύτεροι εξωτερικοί πλανήτες λόγω της ισχυρής βαρυτικής επίδρασης θα ενσωματώσουν όχι μόνο πλανητοειδή, αλλά και μεγάλες ποσότητες αερίου που βρίσκεται στον πρωτοπλανητικό δίσκο, κατά μήκος της τροχιάς τους. Το αέριο περιβάλλει τους πυρήνες (κυρίως πυριτικούς) των πλανητών-εμβρύων και καταρρέει κάτω από τη βαρυτική επίδραση, φτιάχνοντας συμπαγείς γιγάντιους **αέριους πλανήτες (gas giants)**. Φυσικά η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει αρκετά γρήγορα (λιγότερο από 10 εκατομμύρια χρόνια) ώστε να μην απομακρυνθεί το αέριο από τον ηλιακό άνεμο του νέου αστέρα-Ήλιου. Αντίθετα, κοντά στον Ήλιο, ο ισχυρότερος ηλιακός άνεμος διώχνει το αέριο είτε μηχανικά είτε με ιονισμό και οι πλανήτες-έμβρυα θα εξελιχθούν πιο αργά σε πλανήτες, με συνεχείς συγκρούσεις με μικρότερους πλανητοειδείς ή και πλανήτες-έμβρυα.

Στο σχήμα (1.6) παρουσιάζεται μία πιθανή εξέλιξη ενός συστήματος πλανητοειδών οι οποίοι έχουν σχεδόν κυκλική τροχιά (αρχική εκκεντρότητα τροχιάς κοντά στο μηδέν) γύρω από τον Ήλιο, λαβαίνοντας υπ' όψη και τη βαρυτική επίδραση του Δία και του Κρόνου (δεν φαίνονται στο σχήμα), θεωρώντας ότι οι συγκρούσεις οδηγούν τελικά στην δημιουργία μεγαλύτερων σωμάτων και τελικά πλανητών (τροποποιημένο από Chambers, 1998). Η διαδικασία μετά από περί-



Σχήμα 1.6. Προσομοίωση του τελικού σταδίου σχηματισμού των γεωδών πλανητών υπό τη βαρυτική επίδραση του Ήλιου, Δία και Κρόνου, όπου κάθε σύγκρουση πλανητοειδών οδηγεί σε συνένωση. Η θέση των πλανητών-εμβρύων παρουσιάζεται σε διάγραμμα απόστασης από τον ήλιο-εκκεντρότητας τροχιάς (τροποποιημένο από Chambers, 1998).

που 200 εκατομμύρια χρόνια (πολύ αργότερα από τους αέριους γίγαντες) οδηγεί σε πλανήτες ανάλογους των σημερινών γεωδών πλανητών, σε ανάλογες αποστάσεις (μέχρι 2 A.U.), αν και σε διαφορετικές προσομοιώσεις ο αριθμός των γεωδών πλανητών μπορεί να είναι μικρότερος από 4 (3 ή και 2). Παρατηρούμε ότι αν και μετά από 10 εκατομμύρια χρόνια έχουμε 5 κύριους υποψήφιους πλανήτες-έμβρυα (γκρι κύκλοι), ο τελικός αριθμός πλανητών είναι μικρότερος λόγω συγκρούσεων.

Οι παραπάνω περιγραφές δεν πρέπει να δημιουργήσουν την εντύπωση ότι το θέμα της δημιουργίας του ηλιακού συστήματος είναι πλήρως επιλυμένο. Ορισμένοι ερευνητές ισχυρίζονται ότι οι αέριοι γίγαντες δεν μπορούν να έχουν δημιουργηθεί όπως περιγράφηκε προηγουμένως αφού ο ηλιακός άνεμος θα είχε παρασύρει όλες τις αέριες μάζες. Για το λόγο αυτό προτείνουν μία διαδικασία όπου για λόγους αστάθειας το αρχικό αέριο του πρωτοπλανητικού δίσκου καταρρέει, σχηματίζοντας αυτούς τους γίγαντες (π.χ. Boss, 2001). Ακόμη πιο «αιρετικές» απόψεις, ακολουθώντας το αρχικό μοντέλο του Laplace, θεωρούν ότι μηχανισμός υπερηχητικής περιστροφής μέσα στο αρχικό νεφέλωμα (supersonic turbu-

lence) μπορεί να δημιουργήσει δακτυλίους αερίου στον πρωτοπλανητικό δίσκο (Prentice, 1978), οι οποίοι οδηγούν στη γένεση των πλανητών από έξω (Ποσειδών) προς τα μέσα (Ερμής). Αν και η θεωρία αυτή (Νεο-Λαπλασιανή θεωρία) εμφανίζει αρκετές αδυναμίες, είναι η μόνη που προβλέπει μέχρι στιγμής το νόμο Titius-Bode, αλλά και τις περισσότερες τροχιές των πλανητών του Δία και του Κρόνου.

Στο πιο πρόσφατο μοντέλο επαύξησης (Tsiganis et al., 2005), το λεγόμενο μοντέλο της Νίκαιας (από τη Γαλλική πόλη), ο Δίας δημιουργήθηκε με επαύξηση σε ελαφρά μεγαλύτερη απόσταση από τη σημερινή ενώ όλοι οι άλλοι πλανήτες δημιουργήθηκαν σε απόσταση 15 Α.Υ. από τον Ήλιο (βλέπε και Πίνακα 1.1) και περιβάλλονταν εξωτερικά από ένα νέφος πλανητοειδών. Η βαρυτική αλληλεπίδραση των πλανητοειδών με τους μεγάλους εσωτερικούς πλανήτες (Κρόνος, Ουρανός και Ποσειδώνας) οδήγησε στην «μετανάστευσή» τους προς τα έξω (η «μετανάστευση» του Ποσειδώνα είναι πολύ καλά τεκμηριωμένη) ενώ τα μοντέλα δείχνουν μετανάστευση του Δία προς τα μέσα. Το μοντέλο αυτό, αν και πρόσφατο και σχετικά υποθετικό, προβλέπει σειρά από φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί. Για παράδειγμα, όταν ο Κρόνος μεταναστεύοντας προς τα έξω πέρασε από την τροχιά του Δία, ο βαρυτικός «συντονισμός» των 2 γιγαντιαίων πλανητών προκάλεσε έντονα φαινόμενα όπως είναι ο τελευταίος παρατηρημένος ισχυρός βομβαρδισμός μετεωριτών στο φεγγάρι, 700 εκατομμύρια έτη μετά τη γένεση του ηλιακού συστήματος.

Σε κάθε περίπτωση το μοντέλο πρωτοπλανητικού δίσκου-επαύξησης (accretion) εξηγεί πολλά χαρακτηριστικά του ηλιακού μας συστήματος όπως ότι:

- α) Όλοι οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον ήλιο κατά την ίδια φορά.
- β) Όλοι οι πλανήτες (εκτός της Αφροδίτης και του Ουρανού) περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους στην ίδια φορά με αυτή της περιφοράς τους γύρω από τον Ήλιο.
- γ) Όλοι οι πλανήτες έχουν σχεδόν κυκλική τροχιά (ελλειπτικές τροχιές με πολύ μικρή εκκεντρότητα).
- δ) Όλοι οι πλανήτες περιστρέφονται γύρω από τον Ήλιο σχεδόν στο ίδιο επίπεδο (επίπεδο πρωτοπλανητικού δίσκου).

Ίσως περισσότερες πληροφορίες για τη γένεση των πλανητών βρεθούν από τη μελέτη άλλων ηλιακών συστημάτων. Μέχρι τις αρχές του 2008 είχαν βρεθεί περισσότεροι από 220 πλανήτες σε περισσότερα από 190 ηλιακά συστήματα (κυρίως τύπου θερμού αερίου γίγαντα όπως ο Δίας), με τον αστέρα 55 Cancri να έχει 5 γνωστούς πλανήτες. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου υπάρχουν παρατηρήσεις πρωτοπλανητικών δίσκων, εμφανίζονται «κενές» ζώνες (δακτύλιοι) στον

δίσκο, πιθανότατα ενδεικτικοί της δημιουργίας πλανητών στις αντίστοιχες αποστάσεις.

1.5.5 Η γένεση και εξέλιξη του εσωτερικού της Γης

Η φυσική διαδικασία της επαύξεσης της Γης είχε ως συνέπεια την παραγωγή μεγάλων ποσών θερμότητας και την έντονη αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά το τελευταίο στάδιο σχηματισμού του (Allegre et al., 1995).

Σήμερα γίνεται δεκτό (Elsasser, 1963; Birch, 1965; Flasar and Birch, 1973) ότι η Γη επαυξήθηκε από μίγμα πυριτικού και μεταλλικού υλικού που ακολουθήθηκε από διαχωρισμό του μεταλλικού υλικού από το πυριτικό υλικό. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε με κατακόρυφες κινήσεις που καθορίστηκαν από την πυκνότητα του υλικού. Έτσι, γύρω από το κέντρο της Γης συγκεντρώθηκαν τα βαρύτερα υλικά (σίδηρος, νικέλιο) και σχημάτισαν τον **πυρήνα** της ενώ τα ελαφρότερα υλικά (πυριτικές ενώσεις) αποτέλεσαν το **μανδύα** της γύρω από τον πυρήνα.

Υπολογισμοί έδειξαν (Davies, 1990) ότι η βαρυτική ενέργεια που απελευθερώθηκε κατά το σχηματισμό του πυρήνα με αυτή τη φυσική διαδικασία και η μετατροπή της σε θερμότητα επαρκούσε να αυξήσει τη θερμοκρασία του μανδύα κατά 1000 - 2000 °C και να δημιουργήσει ρεύματα μεταφοράς σε αυτόν. Η ύπαρξη της ατμόσφαιρας της Γης κατά το στάδιο αυτό της επαύξεσης και του σχηματισμού του πυρήνα της Γης περιόρισε την ακτινοβολία ενέργειας από τη Γη προς το διάστημα. Αυτό είχε ως συνέπεια την πλήρη τήξη του μανδύα και τη δημιουργία σε αυτόν γρήγορων ρευμάτων μεταφοράς τα οποία εμπόδισαν τη χημική διαφοροποίηση του υλικού του μανδύα κατά το στάδιο αυτό.

Με την πάροδο του χρόνου η Γη απέβαλε θερμότητα με συνέπεια να ψυχθεί. Για το λόγο αυτό, το επιφανειακό υλικό υπέστη στερεοποίηση και σχημάτισε το στερεό **φλοιό** της Γης. Η θερμική αυτή εξέλιξη είχε έντονη επίδραση στη χημική εξέλιξη του πλανήτη. Έτσι, ενώ ο πυρήνας και ο μανδύας της Γης σχηματίστηκαν με επαύξηση (accretion) πριν από 4.6 Ga (1 Ga = 1 δισεκατομμύριο έτη = 10^9 έτη), ο φλοιός της Γης σχηματίστηκε πριν από 3.4 Ga όπως προκύπτει από τη ραδιοχρονολόγηση των πετρωμάτων του.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο διαχωρισμός με κατακόρυφες κινήσεις των πυριτικών υλικών (μανδύας) και μεταλλικών υλικών (πυρήνας) παρουσιάζει και αυτός προβλήματα. Ο κύριος λόγος είναι ότι τα ισχυρά σιδηρόφιλα (HSE) στοιχεία (Re, Au, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir και Os) θα έπρεπε να ακολουθήσουν κατά τη διαδικασία αυτή τον σίδηρο (Fe) στον πυρήνα. Όμως οι σημερινές αναλογίες τους, όπως αυτές αποκαλύπτονται από τους ξενόλιθους μανδύα, είναι σχεδόν ίδιες με αυτές των χονδριτών που υποτίθεται ότι αποτελούν το πρωταρχικό

μανδυακό υλικό (Primitive Upper Mantle-PUM), σαν να μην υπήρξε ποτέ καμία διαφοροποίηση και κατακόρυφη μετακίνηση υλικού (Richter, 2005). Αν και έχουν προταθεί πολύπλοκα μοντέλα για να εξηγήσουν τη διαδικασία δέσμευσης των HSE από το μανδύα, τα προβλήματα αυτά δείχνουν ότι υπάρχουν ακόμα πολλά άγνωστα σημεία της διαδικασίας επαύξεσης και αρχικής διαφοροποίησης της Γης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Airy, G.B. (1855). On the computations of the effect of the attraction of the mountain masses as disturbing the apparent astronomical latitude of stations in geodetic surveys. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 145, 101-104.
- Allegre, C.J., Manhès, G. and Gopel, C. (1995). The age of the Earth *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 1445-1456.
- Birch, F. (1965). Speculations on the Earth's thermal history, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76, 133-154.
- Boss, A. P. (2001). Gas Giant Protoplanet Formation: Disk Instability Models with Thermodynamics and Radiative Transfer, *The Astrophysical Journal*, 563, 367-373.
- Chambers, J. E. (1998). N-Body simulations of planet formation: Varying the initial number of planetary embryos, *Earth, Moon and Planets*, 81, 3-6.
- Davies, G. F. (1990). Heat and mass transport in the early Earth. In: *Origin of the Earth*, H.E. Newsom and J.H. Jones, eds, pp. 175-194, Oxford University Press.
- de Pater, I. and Lissauer, J.J. (2001), *Planetary sciences*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 528pp.
- Elsasser, W.M. (1963). Early history of the Earth. In *Earth Sciences and Meteorites*, L. Geiss and E. D. Goldberg, eds, North Holland, pp. 1-30.
- Flasar, F.M. and Birch, F. (1973). Energetics of core formation, a correction. *J. Geophys. Res.*, 78, 6101-6103.
- Gilbert, W. (1600). *De magnete*. English translation by P.F. Mottelay. 1893, New York, Dover Books Inc.
- Gutenberg, B (1913). Über die konstitution der erdinneren, erschlossen aus erdbebenbeobachtungen. *Phys. Zeit.*, 14, 1217.
- Hess, H.H. (1962). History of ocean basins. In: A.E.J. Engel, H.L. James and B.F. Leonard, eds, *Petrologic studies, A Volume in honor of A.F. Buddington*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, 599-620.
- Kuiper, G. (1951). On the origin of the solar system, In: *Astrophysics, a topical symposium* (ed. J.A. Hynek), McGraw-Hill, New York, 357-424.
- Lehmann, J. (1936). P'. *Trav. Sci. Sect. Seis. UGGI, Toulouse*, 14, 3-31.

- Mohorovicic, A. (1909). Das Beben vom 8,X,1909, Jahrbuch met. Obs. Zagreb, 9, 1-63.
- Oldham, R.D. (1906). The constitution of the earth as revealed by earthquakes. Quart. J. Geol. Soc., 62, 456-475.
- Oort, J.H. (1950). The structure of the cloud of comets surrounding the solar system and a hypothesis concerning its origin, Bull. Astr. Inst. Netherlands, 11, 91-110.
- Pratt, J.H. (1854). On the attraction of the Himalaya mountain and of the elevated regions beyond them, upon the plumb line in India. Phil. Trans. Roy. Lond., 145, 53-100.
- Prentice, A. J. R. (1978). Towards a modern Laplacian theory for the formation of the solar system, In: The origin of the solar system, 111-161, Chichester, Sussex, England and New York, Wiley-Interscience.
- Righter, K. (2005). Highly Siderophile Elements: Constraints on Earth accretion and early differentiation. In: Earth's Deep Mantle: Structure, Composition and Evolution (eds. Van der Hilst, R.D., Bass, J.D., Matas, J. and Trampert, J.), AGU Geophysical Monograph, 160, 201-218.
- Rutherford, E. (1907). Some cosmical aspects of radioactivity. J. Roy. Astr. Soc. Canada, May-June, 145-165.
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A. and Levison, H. F. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System, Nature, 435, 459-461.
- Wegener, A. (1915). Die entstehung der kontinente und ozeane, Sammlung Vieweg, Tagesfragen aus den Gebieten der Naturwissenschaften und der Technik, Braunschweig, 23, 1-94.
- Wegener, A. (1924). The origin of continents and oceans. New York, E.P. Dutton and Company, 212pp.