
5. ηλιακό σύστημα

5.1 Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Πριν από περίπου 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια ένα τεράστιο νέφος από αέρια και σκόνη άρχισε να συμπυκνώνεται σε μια απόμακρη γωνιά του Γαλαξία μας. Τα βασικά συστατικά της αέριας φάσης του νέφους ήταν το υδρογόνο και το ήλιο, τα δύο στοιχεία που δημιουργήθηκαν κατά τη Μεγάλη Έκρηξη. Τα βασικά συστατικά της σκόνης ήταν το πυρίτιο και ο άνθρακας, στοιχεία που σχηματίστηκαν στους πυρήνες μεγάλων αστέρων, οι οποίοι ανήκαν στις πρώτες γενιές των αστέρων του Γαλαξία μας, και τα οποία στη συνέχεια διασκορπίστηκαν στο διάστημα, όταν τα αστέρια αυτά εξερράγησαν ως υπερκαινοφανείς. Το νεφέλωμα αυτό θα το ονομάζουμε στη συνέχεια «ηλιακό», επειδή από το κεντρικό τμήμα του δημιουργήθηκε ο αστέρας που σήμερα αποκαλούμε "Ήλιο", ενώ από το περιφερειακό του τμήμα δημιουργήθηκαν τα υπόλοιπα σώματα του ηλιακού συστήματος, τα οποία θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

Εξαιτίας της δύναμης της βαρύτητας το ηλιακό νεφέλωμα άρχισε να συστέλλεται, γεγονός που είχε για αποτέλεσμα την ελάττωση της δυναμικής του ενέργειας και την αύξηση της θερμοκρασίας του. Επειδή το υλικό του νεφελώματος ήταν αδιαφανές, η θερμότητα διέφευγε δύσκολα από την κεντρική περιοχή του προς τα εξωτερικά στρώματα, έτσι ώστε η θερμοκρασία στο κέντρο του ήταν σημαντικά υψηλότερη από ό,τι στην επιφάνειά του. Εξαιτίας της αδιαφάνειας του νεφελώματος, η ψύξη του γινόταν μόνο από την επιφάνειά του, η οποία, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας της, ακτινοβόλούσε κυρίως στην περιοχή του υπερύθρου. Για το λόγο αυτόν, αλλά και εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του νεφελώματος και του περιβάλλοντος χώρου, η ψύξη ήταν βραδεία.

Καθώς το νεφέλωμα ενύχεται, άρχισαν να σχηματίζονται διαδοχικά διάφορες χημικές ενώσεις. Όταν η θερμοκρασία έπεσε κάτω από τα 2000 K, σχηματίστηκαν ενώσεις του αργιλίου, του ασβεστίου, του μαγνησίου και τιτανίου, ενώ κάτω από τα 1000 K εμφανίστηκαν ενώσεις του πυριτίου και οξειδία μετάλλων. Στα 180 K σχηματίστηκε πάγος από τους υδρατμούς και στα εξωτερικά μέρη του νεφελώματος, όπου η θερμοκρασία είχε πέσει στα 20 K, στερεοποιήθηκε το μεθάνιο. Αποτέλεσμα αυτής της συμπύκνωσης ήταν ο σχηματισμός μικροσκοπικών κόκκων σκόνης από τη στερεά φάση διάφορων χημικών ενώσεων, όπως π.χ. ενώσεων και οξειδίων μετάλλων που αναφέρθηκαν παραπάνω, πάγου, στερεοποιημένου μεθανίου κτλ. Ας σημειωθεί ότι στις παραπάνω θερμοκρασίες τα βασικά συστατικά του ηλιακού νεφελώματος, υδρογόνο και ήλιο, εξακολουθούσαν να βρίσκονται στην αέρια φάση.

Λεπτομερείς υπολογισμοί, για το τι συμβαίνει σε λεπτούς και σχετικά μεγάλης πυκνότητας δίσκους ύλης, έδειξαν ότι η ύλη παύει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, επειδή τείνουν να σχηματισθούν τοπικές συμπυκνώσεις. Έτσι στο ηλιακό νεφέλωμα τα αέρια και οι κόκκοι της σκόνης άρχισαν να συγκεντρώνονται και να σχηματίζουν όγκους ύλης με τυπική διάμετρο μερικά χιλιόμετρα. Για τις συνηθισμένες αστρονομικές κλίμακες χρόνου η όλη διαδικασία της ψύξης, της συμπύκνωσης και της συγκέντρωσης, δεν διήρκεσε μεγάλο χρονικό διάστημα - μόνο μερικές χιλιάδες χρόνια. Στο τέλος αυτής της περιόδου το ηλιακό νεφέλωμα είχε συμπυκνωθεί και είχε σχηματίσει έναν περιστρεφόμενο δίσκο, ο οποίος αποτελούνταν κυρίως από μικρά σώματα που ονομάστηκαν **πλανητοειδείς** (planetoids). Οι πλανητοειδείς, στη συνέχεια, άρχισαν να συγκρούονται μεταξύ τους. Όταν οι συγκρούσεις γίνονταν με μεγάλες ταχύτητες, ώστε να είναι καταστροφικές, οι πλανητοειδείς διαμελίζονταν. Όταν πάλι ήταν πιο ήπιες, τα θραύσματα ενώνονταν, λόγω της αμοιβαίας βαρυτικής έλξης, για να σχηματίσουν μεγαλύτερες μονάδες. Η διαδικασία αυτή κατέληξε στη δημιουργία ενός αριθμού **πρωτοπλανητών** (protoplanets), οι οποίοι αποτελούνταν από τη συνένωση μεγάλου αριθμού πλανητοειδών και για το λόγο αυτό δεν ήταν διαφοροποιημένοι, δηλαδή η χημική τους σύσταση ήταν η ίδια σε κάθε θέση, από το κέντρο προς την επιφάνεια. Η στροφορμή του αρχικού νέφους, σε συνδυασμό με τη βαρυτική έλξη που ασκούσε ο Ήλιος στο ηλιακό νεφέλωμα και την τριβή, είχε ως αποτέλεσμα οι τροχιές των πρωτοπλανητών να βρίσκονται περίπου στο ίδιο επίπεδο.

Στη συνέχεια η θερμοκρασία στο εσωτερικό των πρωτοπλανητών αυξήθηκε αφενός μεν λόγω βαρυτικής συστολής, αφετέρου δε λόγω έκλυσης ενέργειας κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών στοιχείων που περιείχαν. Τα στερεά υλικά έλιωσαν και τα βαρύτερα από αυτά (μέταλλα -κυρίως σίδηρος και νικέλιο) συγκεντρώθηκαν στο κέντρο του κάθε πρωτοπλανήτη ενώ τα ελαφρά (πυρίτιο και αέρια) ανέβηκαν στην επιφάνεια. Την περίοδο αυτή όλοι πλανήτες βρίσκονταν σε ρευστή ή αεριώδη κατάσταση και έτσι απέκτησαν σφαιρικό σχήμα, ώστε τελικά, 10^8 έτη μετά από τη δημιουργία τους, όλοι οι πλανήτες είχαν ήδη αποκτήσει το σχήμα και την τροχιά που έχουν και σήμερα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν οι οκτώ από τους εννέα *μειζονες πλανήτες* του ηλιακού συστήματος: ο **Ερμής** (Mercury), η **Αφροδίτη** (Venus), η **Γη** (Earth), ο **Άρης** (Mars), ο **Δίας** (Jupiter), ο **Κρόνος** (Saturn), ο **Ουρανός** (Uranus) και ο **Ποσειδώνας** (Neptune), τους οποίους στη συνέχεια μαζί με τον **Πλούτωνα** (Pluto) θα ονομάζουμε απλώς **πλανήτες** (planets). Αργότερα, υπό την επίδραση του ισχυρότατου τότε ηλιακού ανέμου, οι πλανήτες της κεντρικής περιοχής (Ερμής, Αφροδίτη, Γη και Άρης) έχασαν την ατμόσφαιρά τους και η επιφάνειά τους ψύχθηκε και στερεοποιήθηκε σε βάθος αντιστρόφως ανάλογο προς την ακτίνα τους. Αντίθετα οι εξωτερικοί πλανήτες (Δίας, Κρόνος, Ουρανός και Ποσειδώνας) διατήρησαν την εκτεταμένη ατμόσφαιρά τους ενώ τα βαριά στοιχεία στον πυρήνα τους παρέμειναν σε ρευστή κατάσταση (βλ. §5.3).

Ένα μέρος από τους πλανητοειδείς που δεν συμμετέσχαν στο σχηματισμό πρωτοπλανητών ενώθηκε και σχημάτισε *δορυφόρους*, οι οποίοι περιφέρονται γύρω από τους (μειζονες) πλανήτες. Ένα άλλο μέρος σχημάτισε τους *ελάσσονες πλανήτες* (ή *αστεροειδείς*) και τους *μετεωροειδείς*, (που αποτελούνται κυρίως από πυρίτιο, οξειδία μετάλλων και άνθρακα) καθώς και τους *κομήτες* (που αποτελούνται κυρίως από παγοκρυστάλλους). Τα σώματα αυτά, που θα τα μελετήσουμε στη συνέχεια (§5.5 και §5.6), είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντα για την ιστορία του ηλιακού συστήματος, επειδή δίνουν στους αστρονόμους στοιχεία για τη σύσταση της ύλης στο αρχικό ηλιακό νεφέλωμα.

Παλιότερα εθεωρείτο ότι η Σελήνη είτε ήταν ένα κομμάτι της Γης, το οποίο αποσχίστηκε λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, είτε είχε σχηματισθεί ταυτόχρονα με τη Γη, με παράλληλη συμπύκνωση ύλης. Σήμερα όμως είναι σχεδόν βέβαιο ότι σχηματίστηκε από τη σύγκρουση (ή παρ' ολίγον σύγκρουση) της σχεδόν στερεοποιημένης νεαρής Γης με κάποιο σώμα μεγάλης μάζας (όσης περίπου αυτής του πλανήτη Άρη). Κατά τη σύγκρουση αποσπάστηκε μάζα από την επιφάνεια της Γης και, μαζί με ένα τμήμα της μάζας του σώματος, δημιούργησαν τελικά τη Σελήνη. Με το σενάριο αυτό δικαιολογείται το γεγονός ότι η Σελήνη έχει πολύ μικρό πυρήνα από μέταλλα, σε σχέση με τη Γη και τα άλλα σώματα του ηλιακού συστήματος με παρεμφερή μάζα, δεδομένου ότι η επιφανειακή ύλη που αποσπάστηκε από τη Γη ήταν πλούσια σε πυρίτιο αλλά πτωχή σε βαριά μέταλλα. Επίσης δικαιολογείται η παρουσία χημικών ενώσεων, αγνώστων στην επιφάνεια της Γης, στα πετρώματα που μετέφεραν από τη Σελήνη οι αστροναύτες της αποστολής *Απόλλων*. Οι χημικές αυτές ενώσεις πρέπει να περιέχονταν στο σώμα που συγκρούστηκε με τη Γη.

5.2 ΗΛΙΟΣ

5.2.1 Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά του Ήλιου

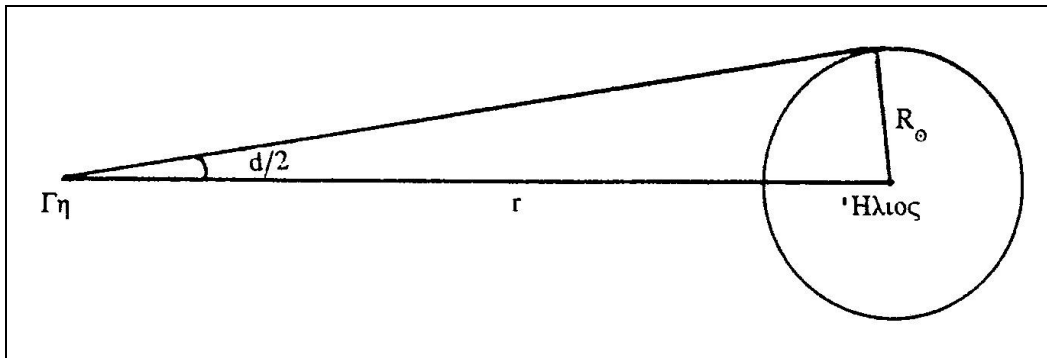
Το γεγονός ότι ο Ήλιος βρίσκεται τόσο κοντά στη Γη, μας κάνει πολλές φορές να ξεχνάμε ότι είναι κι αυτός ένας αστέρας, όπως όλοι οι άλλοι που βλέπουμε στον ουρανό. Η αλήθεια όμως είναι ότι η μάζα, η φωτεινότητα και η θερμοκρασία της επιφάνειας του Ήλιου βρίσκονται ελαφρά μόνο πάνω από τις αντίστοιχες μέσες τιμές που έχουν οι αστέρες του Γαλαξία, και, από την άποψη αυτή, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο Ήλιος μας είναι ένας "τυπικός αστέρας". Ευτυχώς για τους αστρονόμους, αυτός ο "τυπικός" αστέρας βρίσκεται σε όχι "τυπική" απόσταση από τη Γη. Όπως είναι γνωστό η Γη περιφέρεται σε ελαφρώς ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο ενώ ο κοντινότερος αστέρας βρίσκεται σε περίπου 150 000 φορές μεγαλύτερη απόσταση. Παρατηρώντας λοιπόν τον Ήλιο με όλα τα σύγχρονα αστρονομικά όργανα, επίγεια και διαστημικά (οπτικά τηλεσκόπια, ραδιοτηλεσκόπια, τηλεσκόπια υπέρυθρων και υπεριωδών ακτίνων, τηλεσκόπια ακτίνων X και ανιχνευτές σωματιδιακής ακτινοβολίας) συγκεντρώνουμε όλο και περισσότερες πληροφορίες γι' αυτόν.

Μεγάλη σημασία στην παρατηρησιακή μελέτη του Ήλιου έχει η γνώση του μήκους του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς της Γης γύρω απ' αυτόν, που ονομάζεται **αστρονομική μονάδα** (AU – βλ. Βάρβογλη, Σειραδάκη: «Εισαγωγή στη σύγχρονη Αστρονομία», §2.1.2). Ο υπολογισμός της τιμής της αστρονομικής μονάδας βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου ανάκλασης της φωτεινής δέσμης μιας ακτίνας λέιζερ σε ένα κάτοπτρο που τοποθετήθηκε από το πλήρωμα του διαστημοπλοίου *Απόλλων 11* στην επιφάνεια της Σελήνης. Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψε ότι $1 \text{ AU} = 149\,597\,870.6 \text{ km}$.

Ένα άλλο ηλιακό μέγεθος που προσπαθούμε να μετρήσουμε με μεγάλη ακρίβεια, για λόγους που θα γίνουν κατανοητοί στη συνέχεια, είναι η βολομετρική φαινόμενη λαμπρότητα του Ήλιου, δηλαδή η ολική φωτεινή ροή της ακτινοβολίας του Ήλιου σε απόσταση 1 AU. Η βολομετρική λαμπρότητα του Ήλιου ονομάζεται **ηλιακή σταθερά** (solar constant, f) και ισούται με $1.36 \times 10^6 \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Από τις τιμές της ηλιακής σταθεράς, f , και της αστρονομικής μονάδας, AU, μπορούμε, να υπολογίσουμε τη φωτεινότητα, L_{\odot} , του Ήλιου (δηλαδή την ισχύ που αυτός ακτινοβολεί σε όλο το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος). Ο υπολογισμός βασίζεται στην υπόθεση ότι ο Ήλιος ακτινοβολεί ισότροπα, οπότε η ηλιακή σταθερά ισούται με τη φωτεινότητα του Ήλιου διαμοιρασμένη στην επιφάνεια μιας σφαίρας με ακτίνα την αστρονομική μονάδα

$$L_{\odot} = 4\pi f(1 \text{ AU})^2 = 3.9 \times 10^{33} \text{ erg sec}^{-1}$$



Σχήμα 5.1. Υπολογισμός της ακτίνας του Ήλιου.

Η ακτίνα του Ήλιου (αν υποθέσουμε ότι ο Ήλιος είναι σφαιρικός, πράγμα που αληθεύει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια) μπορεί να υπολογιστεί από την τιμή της αστρονομικής μονάδας και τη φαινόμενη διάμετρο του Ήλιου, d , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Από παρατηρήσεις βρίσκουμε ότι η φαινόμενη διάμετρος του Ήλιου είναι

$$d = 32' = 9.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

οπότε

$$R = 1 \text{ AU} \times \sin(d/2) = 1 \text{ AU} \times d/2 = 6.9 \times 10^{10} \text{ cm}$$

Η **ενεργός θερμοκρασία** (effective temperature) του Ήλιου, θεωρούμενου ως μελανού σώματος, υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης

$$L_{\odot} = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4,$$

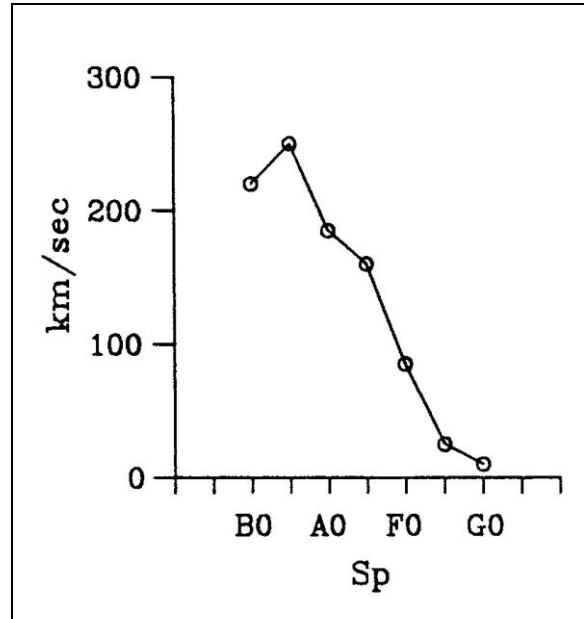
Και βρίσκεται ότι είναι περίπου $T_{\text{eff}} = 5800 \text{ K}$, ο δε *φασματικός τύπος* του G2V.

Η **μάζα του Ήλιου** (solar mass), τέλος, μπορεί να υπολογισθεί από τον τρίτο νόμο του Kepler (π.χ. βλέπε Χατζηδημητρίου, 1985, *Θεωρητική Μηχανική, Τεύχος Α*, σελ. 125)

$$A^3/P^2 = G(M_{\odot} + M_{\Gamma})/4\pi^2$$

αν θέσουμε $A = 1 \text{ AU}$, $P = 1 \text{ yr}$ και αγνοήσουμε τη μάζα της Γης σε σύγκριση με τη μάζα του Ήλιου, θέτοντας $M_{\Gamma} = 0$. Με τον τρόπο αυτό βρίσκουμε $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ gr}$.

Ο Ήλιος, όπως άλλωστε και οι υπόλοιποι αστέρες, περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Η ταχύτητα περιστροφής του (γωνιακή ή γραμμική) μπορεί να μετρηθεί με περισσότερες από μία μεθόδους, λόγω της σχετικά μικρής απόστασής του από τη Γη. Μία μέθοδος προσδιορισμού αυτής της ταχύτητας, η παλιότερη, βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται, ώστε τα διάφορα μακρόβια φαινόμενα της επιφάνειάς του (κυρίως οι κηλίδες) να επανέλθουν στο ίδιο σημείο. Μια άλλη μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση της μετατόπισης Doppler των φασματικών γραμμών του φωτός που προέρχεται από το χείλος του Ήλιου. Οι διάφορες μέθοδοι δίνουν την ίδια βασικά εικόνα, αν και οι συγκεκριμένες τιμές ταχυ-



Σχήμα 5.2. Ταχύτητα περιστροφής των αστέρων ως συνάρτηση του φασματικού τύπου, Sp.

τήτων που προκύπτουν διαφέρουν αισθητά. Οι διαφορές αυτές σήμερα αποδίδονται στο ότι με τις διάφορες μεθόδους μετρούνται οι ταχύτητες περιστροφής του ηλιακού υλικού σε διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο του Ήλιου (ή, ισοδύναμα, σε διαφορετικά βάρη από την επιφάνειά του, μέχρι $0.1 R_{\odot}$), και αυτές διαφέρουν επειδή ο Ήλιος δεν περιστρέφεται ως στερεό σώμα.

Η εικόνα της περιστροφής του Ήλιου είναι αρκετά παράδοξη και δεν έχει ακόμη εξηγηθεί ικανοποιητικά. Ο Ήλιος δεν περιστρέφεται διαφορετικά μόνο καθ' ύψος (έκφραση που σημαίνει ότι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ενός στοιχειώδους όγκου του ηλιακού υλικού είναι συνάρτηση της απόστασης, r , του στοιχειώδους αυτού όγκου από το κέντρο του Ήλιου), αλλά και κατά ηλιογραφικό πλάτος. Συγκεκριμένα η περίοδος περιστροφής ενός στοιχείου της επιφάνειας του Ήλιου στην περιοχή του ισημερινού του είναι περίπου 25 μέρες (που αντιστοιχεί σε γραμμική ταχύτητα περίπου 2 km sec^{-1}), ενώ η περίοδος κοντά στους πόλους είναι μεγαλύτερη από 27 μέρες. Η διαφορά αυτή δεν έχει σήμερα εξηγηθεί επαρκώς, έχει όμως καθοριστική σημασία στη δημιουργία του γενικού μαγνητικού πεδίου του Ήλιου καθώς και στη δημιουργία όλων των φαινομένων που παρατηρούμε σ' αυτόν, όπως π.χ. οι ηλιακές κηλίδες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο Ήλιος είναι ένας τυπικός αστέρας και όσον αφορά στη γωνιακή περίοδο περιστροφής του. Από μετρήσεις της πλάτυνσης των φασματικών γραμμών (που οφείλεται στην αξονική περιστροφή των αστέρων) προκύπτει ότι οι μεταγενέστερου φασματικού τύπου αστέρες έχουν όλοι παραπλήσιες γραμμικές ταχύτητες ($\sim 2 \text{ km/sec}$). Οι αστέρες όμως προγενέστερων φασματικών τύπων φαίνεται ότι περιστρέφονται πολύ ταχύτερα, με γραμμικές ταχύτητες της τάξης των 200 km/sec , που αντιστοιχούν σε περιόδους περιστροφής της τάξης των λίγων ημερών (βλέπε Σχήμα 5.2). Η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής των αστέρων προγενέστερου και μεταγενέστερου φασματικού τύπου (Σχήμα 5.2) δεν έχει σήμερα εξηγηθεί επαρκώς, πιστεύεται όμως ότι έχει σχέση με τον τρόπο δημιουργίας των αστέρων και με την ύπαρξη ή όχι πλανητικών συστημάτων.

5.2.2 Επιφάνεια του Ήλιου

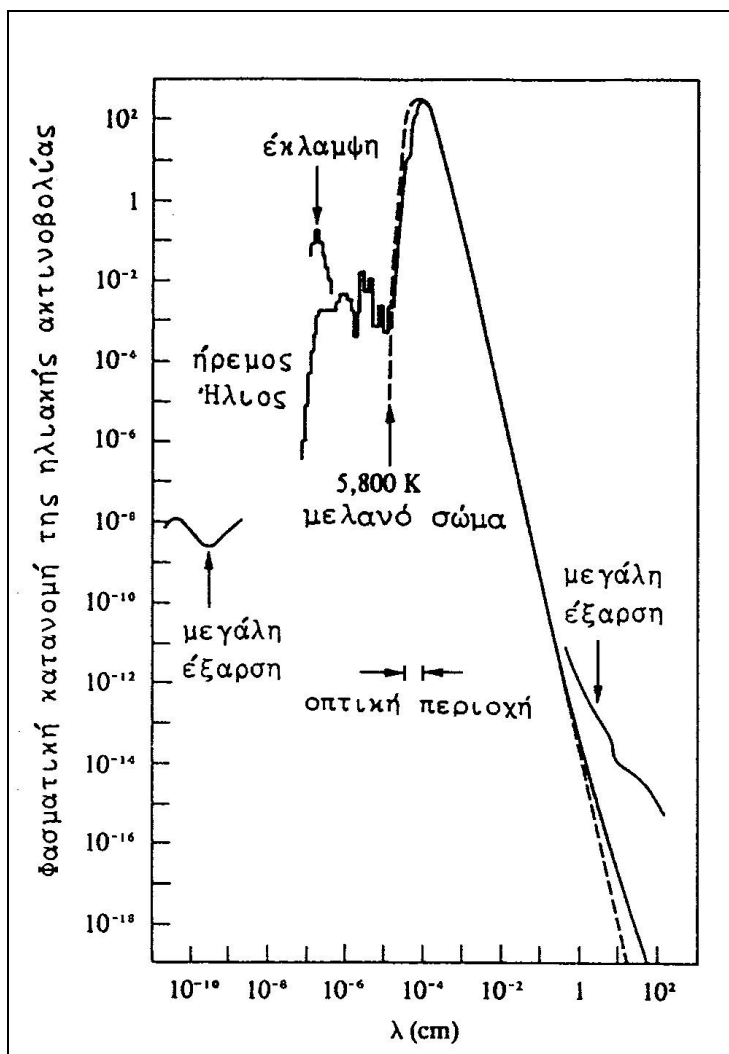
Η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας ενός μελανού σώματος θερμοκρασίας T_{eff} δίνεται από το νόμο του Planck, ενώ η αντίστοιχη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έχει βρεθεί από παρατηρήσεις. Η σύγκριση των δύο κατανομών (θεωρητικής και παρατηρούμενης) γίνεται στο Σχήμα 5.3. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ τους οφείλονται κυρίως στις εξής τέσσερις αιτίες:

α) Η ακτινοβολία του Ήλιου που φθάνει σ' εμάς προέρχεται από διαφορετικά βάρη των εξωτερικών στρωμάτων του Ήλιου, τα οποία έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Έτσι η φωτεινή ένταση σε μια φασματική περιοχή είναι το άθροισμα των εντάσεων κατανομών που αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

β) Στα μεγάλα (ραδιοφωνικά) και στα μικρά μήκη κύματος (υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες X) η ακτινοβολία του Ήλιου δεν είναι θερμικής φύσης, δηλαδή δεν ακολουθεί το νόμο του Planck.

γ) Το ηλιακό φάσμα παρουσιάζει γραμμές απορρόφησης (γνωστότερες και ως *γραμμές Fraunhofer*), οι οποίες ελαττώνουν τη μέση ένταση της ακτινοβολίας στην περιοχή που εμφανίζονται. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στην περιοχή του ορίου συσσώρευσης των γραμμών της σειράς Balmer, που ονομάζεται **ασυνέχεια Balmer** (Balmer discontinuity – στην κορυφή της κατανομής του Σχήματος 5.3). Υπενθυμίζεται ότι στην ασυνέχεια Balmer οφείλεται και το "σιγμοειδές" σχήμα του γεωμετρικού τόπου των αστέρων της κύριας ακολουθίας στο διάγραμμα δύο χρωμάτων (βλ Βάρβογλη, Σειραδάκη: «Εισαγωγή στη σύγχρονη Αστρονομία», §3.3 και Σχ. 3.5).

δ) Τέλος η ύλη που ακτινοβολεί θερμικά δεν βρίσκεται σε τοπική θερμοδυναμική ισορροπία και, άρα, δεν ισχύει ακριβώς ο νόμος του Planck. Αξίζει να σημειωθεί πάντως, ότι η απόκλιση της κατανομής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από αυτήν του μελανού σώματος,



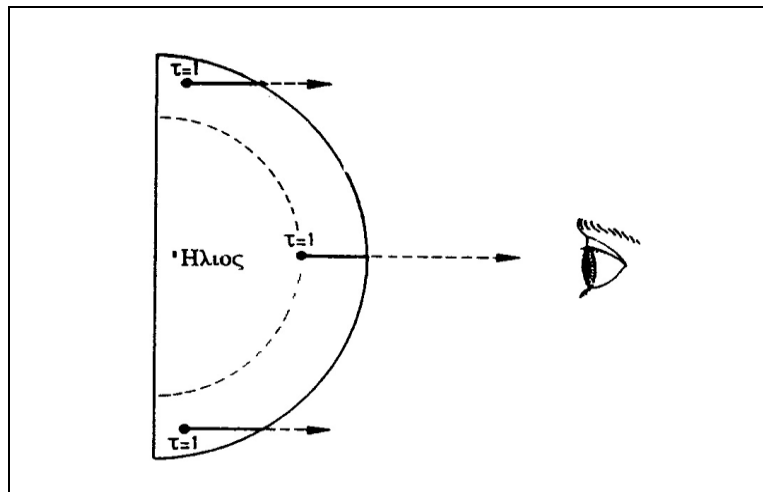
Σχήμα 5.3. Κατανομή της ειδικής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

λόγω της μη ακριβούς θερμοδυναμικής ισορροπίας, είναι ασήμαντη σε σχέση με τις τρεις προηγούμενες αιτίες.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ενεργός θερμοκρασία $T_{\text{eff}} = 5\,800\text{ K}$ του Ήλιου δεν χαρακτηρίζει κάποιο συγκεκριμένο στρώμα του, αλλά αποτελεί απλώς έναν, εύχρηστο σε θεωρητικούς υπολογισμούς, μέσον όρο.

Το στρώμα από το οποίο εκπέμπονται τα φωτόνια του συνεχούς οπτικού φάσματος του Ήλιου έχει πάχος περίπου το 0.1% της ηλιακής ακτίνας και ονομάζεται **φωτόσφαιρα**. (photosphere) Λόγω του πολύ λεπτού πάχους της, η φωτόσφαιρα θεωρείται πολλές φορές ως η επιφάνεια του Ήλιου, αφού άλλωστε ο ορισμός αυτός συμφωνεί και με τη μακροσκοπική εικόνα που παίρνουμε από τις παρατηρήσεις στα οπτικά μήκη κύματος, στα οποία ο Ήλιος φαίνεται να έχει καλά καθορισμένα άκρα. Θα πρέπει, όμως, η έννοια της επιφάνειας του Ήλιου, ο οποίος δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι είναι μια αέρια σφαίρα, να χρησιμοποιείται με προσοχή για να αποφεύγονται παρανοήσεις (π.χ. τα όρια του δίσκου του Ήλιου στα ραδιοκύματα και τις ακτίνες X είναι αρκετά ασαφή και δεν συμπίπτουν με τα όρια της φωτόσφαιρας).

Επειδή από τη θερμοδυναμική είναι γνωστό ότι η ενέργεια ρέει από τις θερμότερες προς τις ψυχρότερες περιοχές, συμπεραίνουμε ότι ο Ήλιος, ο οποίος ακτινοβολεί ενέργεια στο ψυχρό Σύμπαν, θα πρέπει να έχει υψηλότερη θερμοκρασία στο εσωτερικό παρά στην επιφάνειά του. Αυτό το θεωρητικό συμπέρασμα



Σχήμα 5.4 Ερμηνεία του φαινομένου της αμαύρωσης του χείλους του Ήλιου

επιβεβαιώνεται και παρατηρησιακά από το φαινόμενο της **αμαύρωσης του χείλους** (limb darkening), κατά το οποίο τα χείλη του ηλιακού δίσκου φαίνονται στο "λευκό φως" σκοτεινότερα απ' ό,τι το κέντρο του. Το φαινόμενο εξηγείται στο Σχήμα 5.4, όπου βλέπουμε ότι ένας παρατηρητής που παρατηρεί προς τα χείλη βλέπει ψυχρότερα (και άρα σκοτεινότερα, λόγω του νόμου των Stefan-Boltzmann) στρώματα του Ήλιου. Ακόμη από αυτήν τη βασική δομή (θερμό εσωτερικό - ψυχρό εξωτερικό) μπορεί να ερμηνευθεί και η ύπαρξη των γραμμών Fraunhofer. Αξίζει όμως να σημειώσουμε ότι, στην πραγματικότητα, αυτό δεν είναι ακριβώς σωστό. Οι γραμμές απορρόφησης δημιουργούνται σε μια μεγάλη ζώνη του Ήλιου που ξεκινά από τη φωτόσφαιρα, περιλαμβάνει τη **χρωμόσφαιρα** (chromosphere –δηλαδή την κατώτερη ατμόσφαιρα) και φθάνει μέχρι το **στέμμα** (corona -δηλαδή το εξωτερικό τμήμα της ατμόσφαιρας του Ήλιου).

5.3 ΟΙ ΠΛΑΝΗΤΕΣ

Από τη λύση του κλασικού προβλήματος των δύο σωμάτων γνωρίζουμε ότι αν μόνο ένας πλανήτης περιφερόταν γύρω από τον Ήλιο, τότε η τροχιά του θα ήταν έλλειψη. Αλλά η

παρουσία και άλλων πλανητών επηρεάζει την κίνηση του καθενός από αυτούς (προκαλώντας αυτό που ονομάζουμε παρέλξεις), έτσι ώστε η τροχιά τους δεν είναι ακριβώς έλλειψη. Οι διαφορές όμως είναι τόσο μικρές, ώστε πρακτικά θεωρούμε ότι είναι έλλειψη, τα στοιχεία της οποίας (μεγάλος ημιάξονας, εκκεντρότητα κλπ.) μεταβάλλονται *αργά* με το χρόνο. Σε αυτό το επίπεδο προσέγγισης οι τροχιές όλων των πλανητών εμφανίζουν ακριβώς τα χαρακτηριστικά που θα περιμέναμε, αν το ηλιακό σύστημα είχε σχηματιστεί από ένα δισκοειδές ηλιακό νεφέλωμα. Για παράδειγμα, όλες οι τροχιές βρίσκονται σχεδόν στο ίδιο επίπεδο (το επίπεδο της *εκλειπτικής*, δηλαδή το επίπεδο της τροχιάς της Γης). Η τροχιά της Αφροδίτης έχει κλίση $3^{\circ}.4$ ως προς την εκλειπτική και του Ερμή, του κοντινότερου στον Ήλιο πλανήτη, έχει 7° . Οι τροχιές όλων των άλλων πλανητών έχουν μικρότερες κλίσεις, εκτός αυτής του Πλούτωνα, η οποία έχει κλίση πάνω από 17° . Το γεγονός αυτό, μαζί με άλλα χαρακτηριστικά (π.χ. τη μικρή ανακλαστικότητα της επιφάνειάς του), έκανε τους αστρονόμους να συμπεράνουν ότι ο Πλούτωνας δεν ανήκει πραγματικά στους (μείζονες) πλανήτες. Σήμερα πιστεύουμε ότι ανήκει στα σώματα της ζώνης των *Edgeworth–Kuiper* (βλ. παρακάτω) και απέκτησε τη σημερινή τροχιά του λόγω των παρέλξεων των πλανητών (κυρίως του Ποσειδώνα και του Ουρανού).

Αν εξαιρέσουμε λοιπόν τον Πλούτωνα, οι τροχιές των άλλων πλανητών βρίσκονται ουσιαστικά πάνω στο ίδιο επίπεδο. Δεν ισχύει το ίδιο για τους *ελάσσονες πλανήτες ή αστεροειδείς* (§5.5), για τους *κομήτες* (§5.6) καθώς και για τα υπόλοιπα μικρά αντικείμενα του πλανητικού μας συστήματος τα οποία συλλήβδην ονομάζονται **μετεωροειδείς** (meteoroids). Οι τροχιές των κομητών, ιδιαίτερα, ποικίλλουν κατά πολύ σε κλίση. Μερικοί κομήτες έχουν τόσο μεγάλη κλίση (μεγαλύτερη από 90°), που κινούνται γύρω από τον Ήλιο ανάδρομα, με άλλα λόγια περιφέρονται κατά την αντίθετη φορά από αυτήν που περιφέρονται οι μείζονες και οι ελάσσονες πλανήτες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο κομήτης του Halley, του οποίου η τροχιά έχει κλίση ως προς την εκλειπτική 162° .

Το δεύτερο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των πλανητών είναι ότι οι τροχιές τους είναι σχεδόν κυκλικές και σχετικά ευσταθείς, δηλαδή, στο επίπεδο προσέγγισης που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, μπορούν να θεωρηθούν ως ελλείψεις, η εκκεντρότητα των οποίων μεταβάλλεται με το χρόνο αλλά δεν απομακρύνεται πολύ από την τιμή 0, η οποία αντιστοιχεί σε κυκλική τροχιά. Βέβαια και πάλι υπάρχουν εξαιρέσεις. Για παράδειγμα, η εκκεντρότητα της τροχιάς του Ερμή είναι 0.206, τιμή πέντε φορές μεγαλύτερη από τη μέση εκκεντρότητα των άλλων πλανητών. Αλλά ακόμη κι αυτή δεν πλησιάζει τις μέγιστες τιμές της εκκεντρότητας των ελασσόνων πλανητών (ή αστεροειδών) και κυρίως των κομητών, οι οποίες εγγίζουν την τιμή 1.

Ένα τρίτο χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι όλοι οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο κατά την ορθή φορά, δηλαδή αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού, όταν τους βλέπουμε από «πάνω» (δηλαδή από το βόρειο πόλο της εκλειπτικής). Αυτό αποτελεί μία ακόμη ένδειξη ότι σχηματίστηκαν από ένα περιστρεφόμενο ηλιακό νεφέλωμα.

Οι πλανήτες διαίρούνται σε δύο ομάδες. Πιο κοντά στον Ήλιο βρίσκονται οι *γήινοι πλανήτες*, που ονομάζονται έτσι γιατί έχουν πολλές ομοιότητες με τη Γη. Αυτοί είναι ο *Ερμής*, η *Αφροδίτη*, (η *Γη*) και ο *Άρης*. Η δεύτερη ομάδα, που περιέχει τους επονομαζόμενους *αεριώδεις γίγαντες*, βρίσκεται πιο μακριά, πέρα από τον Άρη. Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει το *Δία*, τον *Κρόνο*, τον *Ουρανό* και τον *Ποσειδώνα*. Οι αεριώδεις γίγαντες περιβάλλονται από *δακτυλίους* στο επίπεδο του ισημερινού τους. Οι δακτύλιοι του Κρόνου (A: εσωτερικός, B: ο λαμπρότερος, E: ο εξωτερικός) είναι εμφανείς και με απλό τηλεσκόπιο από τη Γη, ενώ οι δακτύλιοι των άλλων τριών γιγάντων είναι αμυδροί και ανιχνεύονται μόνο από αστρονομικά παρατηρητήρια

έξω από την ατμόσφαιρα της Γης. Επίσης, όλοι οι αεριώδεις γίγαντες έχουν στερεούς πυρήνες και περιβάλλονται από εκτεταμένες ψυχρές ατμόσφαιρες, όπου υπάρχουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου, αμμωνίας, ηλίου και υδρογόνου. Τέτοια ελαφρά αέρια υπήρχαν αρχικά και στους γήινους πλανήτες, αλλά παρασύρθηκαν στο διάστημα από τον ηλιακό άνεμο, ο οποίος στη νεαρή ηλικία του Ήλιου ήταν πολύ πιο έντονος από ό,τι είναι σήμερα. Η σημερινή ατμόσφαιρα της Γης δημιουργήθηκε από την απελευθέρωση αερίων από το εσωτερικό της και κυρίως από τον πυρήνα της, όταν αυτός έλιωσε, λόγω της μεγάλης θερμότητας που εκλύθηκε από ραδιενεργές διασπάσεις (βλ. § 5.1).

Πέρα από την *τροχιακή στροφορμή* που έχουν οι πλανήτες, λόγω της περιφοράς τους γύρω από τον Ήλιο, έχουν και *περιστροφική στροφορμή* λόγω της περιστροφής τους γύρω από τον άξονά τους. Η περιφορά του κάθε πλανήτη γύρω από τον Ήλιο έχει ως αποτέλεσμα την εναλλαγή των εποχών του έτους τους ενώ η περιστροφή έχει ως αποτέλεσμα την εναλλαγή της ημέρας και της νύκτας επάνω σε κάθε πλανήτη. Ο Πίνακας 5.1 δίνει συνοπτικά τα κυριότερα στοιχεία των εννέα πλανητών.

Από τον Πίνακα 5.1 διαπιστώνουμε ότι οι μάζες των πλανητών είναι κατά πολύ μικρότερες από τη μάζα του Ήλιου. Για παράδειγμα, η μάζα του Δία, του μεγαλύτερου σώματος του πλανητικού συστήματός μας (εκτός του Ήλιου), είναι ίση με το 10^{-3} της μάζας του Ήλιου. Εξαιτίας της μικρής μάζας των πλανητών, τόσο η πίεση όσο και η θερμοκρασία τους αυξάνουν μεν από την επιφάνεια προς το εσωτερικό τους, ποτέ όμως δεν φθάνουν τις υψηλές εκείνες τιμές που απαιτούνται για να αρχίσουν και να διατηρηθούν θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, ανάλογες με εκείνες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του Ήλιου και των αστερών. Για το λόγο αυτόν στο εσωτερικό των πλανητών δεν παράγεται ενέργεια με αποτέλεσμα η μέση επιφανειακή θερμοκρασία τους να οφείλεται κατά κύριο λόγο στη θέρμανσή τους από την ηλιακή ακτινοβολία και να είναι χαμηλή (π.χ. της Γης είναι 288 K). Λόγω της χαμηλής επιφανειακής θερμοκρασίας των πλανητών, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνειά τους αυθόρμητα (δηλαδή η *θερμική ακτινοβολία*, με κατανομή μελανού σώματος θερμοκρασίας ίσης προς τη μέση επιφανειακή θερμοκρασία της επιφάνειας του πλανήτη) έχει μέγιστη ένταση στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος (υπερύθρη περιοχή του φάσματος). Αντίθετα, στην ορατή περιοχή του φάσματος είναι σώματα ετερόφωτα. Καθίστανται, δηλαδή, ορατά χάρις στο ηλιακό φως που προσπίπτει στην επιφάνειά τους και ανακλάται ή διαχέεται και πάλι προς το διάστημα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκτός από τους πλανήτες, τους δορυφόρους και τους κομήτες, στο ηλιακό σύστημα υπάρχουν και οι ελάχιστονες πλανήτες (ή αστεροειδείς), οι περισσότεροι εκ των οποίων βρίσκονται στην **κύρια ζώνη των αστεροειδών** (asteroids main belt), μεταξύ των τροχιών του Άρη και του Δία. Η ύπαρξη κομητών μικρής περιόδου (με περίοδο μικρότερη από 150 χρόνια) έκανε τον Βρετανό αστρονόμο Kenneth Edgeworth και τον Ολλανδό συνάδελφό του Gerard Kuiper να υποθέσουν (το 1943) ότι υπάρχει και δεύτερη ζώνη με μικρά σώματα, πέραν από την τροχιά του Ποσειδώνα. Η ζώνη αυτή, που ονομάστηκε **ζώνη Edgeworth–Kuiper** (Edgeworth-Kuiper belt), εκτείνεται σε ένα δακτύλιο μεταξύ 30 και 1000 AU από τον Ήλιο. Λόγω αυτής της θέσης τους, τα σώματα που ανήκουν σ' αυτήν τη ζώνη ονομάζονται και **Υπερ-Ποσειδώνια Αντικείμενα** (Trans-Neptunian Objects, TNO). Το μακρινότερο TNO που έχει ανιχνευθεί μέχρι σήμερα ακολουθεί πολύ έκκεντρη τροχιά με μεγάλο ημιάξονα 220 AU και εκκεντρότητα 0.8. Δεν είναι σαφές αν τα TNO, που σήμερα εκτιμάται ότι ανέρχονται σε περίπου 80.000, ανήκουν στην κατηγορία των ελασσόνων

πλανητών (αστεροειδών) ή των κομητών. Πολλοί αστρονόμοι θεωρούν ότι ίσως ο διαχωρισμός των μικρών σωμάτων του ηλιακού συστήματος σε ελάσσονες πλανήτες (ή αστεροειδείς) και κομήτες να μην είναι γενικά απόλυτος. Λόγω της μεγάλης απόστασης των TNO από τη Γη και της μικρής ανακλαστικότητας της επιφάνειάς τους, η λαμπρότητά τους είναι πολύ μικρή (το αστρικό τους μέγεθος είναι πολύ μεγάλο) και έτσι είναι ορατά μόνο με σχετικά μεγάλα τηλεσκόπια. Για το λόγο αυτό η ανακάλυψη τέτοιων σωμάτων είναι αποτέλεσμα των τελευταίων ετών (από το 1992 και μετά). Μέχρι σήμερα (2001) έχουν ανακαλυφθεί περί τα 150 TNO. Μερικά από αυτά έχουν μάζα συγκρίσιμη με αυτήν του Πλούτωνα, γεγονός που επιβεβαιώνει την άποψη ότι ο Πλούτωνας θα πρέπει να θεωρείται TNO και όχι πλανήτης.

Πέρα από τις δύο ζώνες που ήδη αναφέραμε (ζώνη αστεροειδών και ζώνη *Edgeworth-Kuiper*), υπάρχει και μια τρίτη, το **νέφος του Oort** (Oort cloud). Η περιοχή που καλύπτει η ζώνη αυτή (που πήρε το όνομά της από τον Ολλανδό αστρονόμο Jan Oort) είναι ένας σφαιρικός φλοιός με κέντρο τον Ήλιο και θεωρείται ως η κύρια πηγή των κομητών μακράς περιόδου (μεγαλύτερης από 150 χρόνια). Καταλαμβάνει μια ευρεία περιοχή του διαστήματος που ξεκινάει από απόσταση 1000 AU και εκτείνεται μέχρι 50000 AU. Το νέφος του Oort επομένως εκτείνεται σε πολύ μακρινές αποστάσεις, λίγο μεγαλύτερες από το ένα τέταρτο της απόστασης του πλησιέστερου προς τον Ήλιο αστέρα, που είναι ο Εγγύτατος του Κενταύρου.

5.4 ΟΙ ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΙ ΤΩΝ ΠΛΑΝΗΤΩΝ

5.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Οι περισσότεροι από τους πλανήτες περιβάλλονται από δορυφόρους, οι οποίοι περιφέρονται περί τον αντίστοιχο πλανήτη, ενώ συγχρόνως τον ακολουθούν στη μεταβατική κίνησή του γύρω από τον Ήλιο. Ο Ερμής και η Αφροδίτη στερούνται δορυφόρων, η Γη έχει έναν δορυφόρο (τη Σελήνη) και ο Άρης δύο. Οι αεριώδεις γίγαντες φαίνεται ότι έχουν πάρα πολλούς δορυφόρους, με αποτέλεσμα κάθε χρόνο να ανακαλύπτονται νέοι. Μέχρι το τέλος του 2000 είχαν ανακαλυφθεί 17 δορυφόροι του Δία, 24 του Κρόνου, 21 του Ουρανού και 8 του Ποσειδώνα. Τέλος ο Πλούτωνας έχει ένα δορυφόρο, τον Χάροντα (που ανακαλύφθηκε σχετικά πρόσφατα, το 1978). Ο Πίνακας 5.2 δίδει τα στοιχεία των κυριότερων από τους παραπάνω δορυφόρους.

Από τον Πίνακα 5.2 διαπιστώνουμε, ότι ορισμένοι δορυφόροι έχουν διάμετρο της τάξεως των λίγων km, όπως συμβαίνει λ.χ. με τους δύο δορυφόρους του Άρη, ενώ οι διάμετροι άλλων δορυφόρων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες. Έτσι λ.χ., η διάμετρος του *Γανυμήδη*, που είναι ο μεγαλύτερος από τους δορυφόρους του πλανητικού μας συστήματος, είναι ίση με 5262 km, δηλαδή μεγαλύτερη από τη διάμετρο του Ερμή (4878 km) και του Πλούτωνα (2300 km). Το γεγονός αυτό, καθώς και η ύπαρξη δορυφόρων που περιφέρονται γύρω από πλανήτες κατά την ανάδρομη φορά (και για το λόγο αυτόν ονομάζονται **ανώμαλοι δορυφόροι** –irregular satellites–) πρέπει να ληφθούν υπόψη σε κάθε θεωρία που προσπαθεί να ερμηνεύσει τη δημιουργία του πλανητικού μας συστήματος. Για παράδειγμα, σήμερα πιστεύουμε ότι οι δορυφόροι με ανώμαλες τροχιές δεν σχηματίστηκαν εξ αρχής στην περιοχή του πλανήτη, αλλά ήταν μετεωροειδείς ή ελάσσονες πλανήτες (αστεροειδείς) που, κάποια εποχή, κατά το αρχικό στάδιο δημιουργίας του πλανήτη, πέρασαν κοντά από αυτόν, η τροχιά τους διαταράχθηκε,

συνελήφθησαν από το πεδίο βαρύτητας του πλανήτη και, έκτοτε, κατέληξαν να περιφέρονται γύρω από αυτόν.

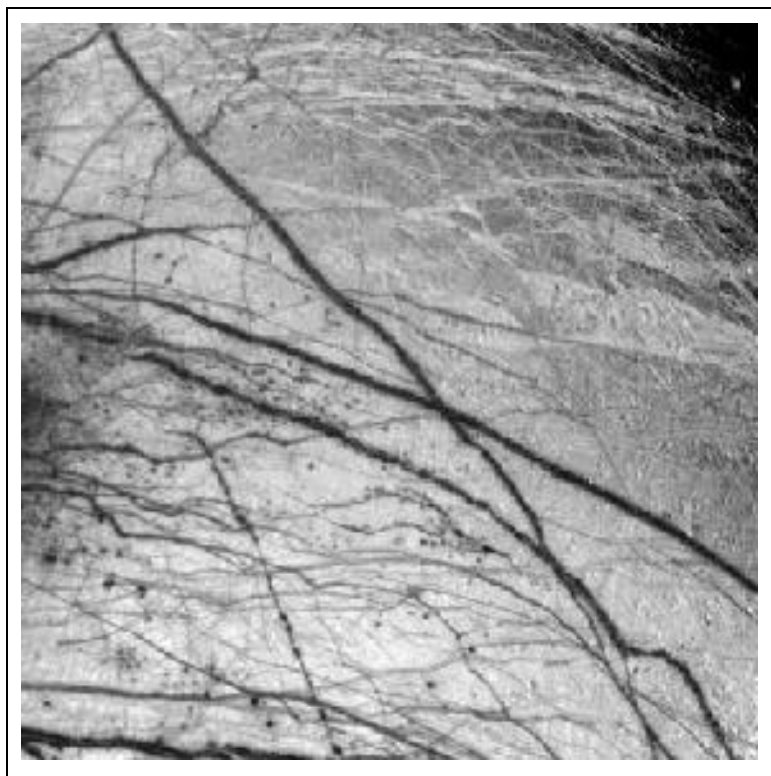
5.4.2 Οι ιδιόμορφοι δορυφόροι Ευρώπη, Τιτάν και Εγκέλαδος

α) Ευρώπη

Η **Ευρώπη** είναι ο δεύτερος από τους λαμπρούς δορυφόρους του Δία. Ανακαλύφθηκε το 1610 από τον Γαλιλαίο, ο οποίος με το πρωτόγονο τηλεσκόπιό του βρήκε ότι η περίοδος περιφοράς της γύρω από τον Δία είναι 3.5 ημέρες. Η διάμετρός της είναι 3138 km και επομένως είναι μόλις μικρότερη από τη Σελήνη αλλά μεγαλύτερη από τον Πλούτωνα. Η χημική σύστασή της είναι παρόμοια με αυτήν των γήινων πλανητών.

Πρόσφατες παρατηρήσεις, με το διαστημόπλοιο Galileo, αποκάλυψαν την ύπαρξη ενός μικρού μεταλλικού πυρήνα, ενώ τα εξωτερικά στρώματα αποτελούνται κυρίως από πετρώματα πλούσια σε πυρίτιο. Αυτό που χαρακτηρίζει όμως την επιφάνεια της Ευρώπης είναι η σχεδόν παντελής έλλειψη κρατήρων και η εκτεταμένη κάλυψή της από πάγους. Οι πάγοι, μάλιστα, εμφανίζουν χαρακτηριστικές σχισμές μήκους πολλών εκατοντάδων χιλιομέτρων και πλάτους μέχρι 20 km. Το πιθανότερο σενάριο είναι ότι οι σχισμές των πάγων δημιουργήθηκαν από τις περιοδικές παλιρροιογόνες δυνάμεις που εξασκεί ο Δίας στην Ευρώπη, εξ αιτίας των οποίων δημιουργούνται τριβές και επομένως μεγάλες θερμοκρασίες στο εσωτερικό της, το οποίο αναμένεται να περιέχει σημαντικές ποσότητες υγρού ύδατος. Οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας προκαλούν έντονες εποχιακές μεταβολές, τόσο στο εσωτερικό του δορυφόρου όσο και στην παγωμένη επιφάνειά του, η οποία θρυμματίζεται. Η ύπαρξη ύδατος σε υγρή μορφή στο εσωτερικό της Ευρώπης επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου της, η διεύθυνση του οποίου μεταβάλλεται περιοδικά καθώς αυτή περιφέρεται γύρω από τον Δία. Η μεταβολή αυτή υπολογίστηκε ότι μπορεί να οφείλεται στα άλατα που περιέχει εν διαλύσει το νερό.

Σημαντική είναι επίσης η ανίχνευση ατμόσφαιρας που περιέχει οξυγόνο στην Ευρώπη, καθιστώντας την ένα από τους 6 δορυφόρους (μεταξύ των 74 του πλανητικού συστήματός μας) που έχουν ατμόσφαιρα.



Σχήμα 5.5 Η θρυμματισμένη επιφάνεια της Ευρώπης

Η ύπαρξη ύδατος στο εσωτερικό, πάγου στην επιφάνεια και οξυγόνου στην ατμόσφαιρα της Ευρώπης την καθιστούν προφανή στόχο για διαστημικές αποστολές ανίχνευσης εξωγήινης ζωής. Ήδη η NASA σχεδιάζει την αποστολή προς τον ενδιαφέροντα αυτό δορυφόρο ενός ειδικού διαστημοπλοίου (Europa Orbiter) το 2010.

β) Τιτάν

Ο **Τιτάνας** είναι ο μεγαλύτερος δορυφόρος του Κρόνου. Η διάμετρός του (5150 km) τον καθιστά δεύτερο σε μέγεθος δορυφόρο (μετά τον δορυφόρο του Δία, Γανυμήδη) στο ηλιακό σύστημα, ενώ είναι και μεγαλύτερος από τους πλανήτες Πλούτωνα και Ερμή. Ανακαλύφθηκε από τον Huygens το 1655.

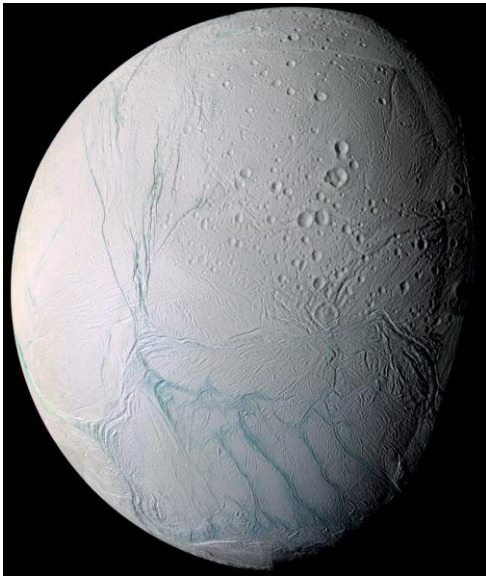
Αυτό που καθιστά τον Τιτάνα μοναδικό στο ηλιακό σύστημα είναι η πυκνή ατμόσφαιρά του, η οποία αποτελείται από άζωτο (που υπάρχει και στην ατμόσφαιρα της Γης), αργόν, μεθάνιο και ίχνη άλλων ενώσεων (οργανικών, όπως αιθάνιο και υδροκυάνιο, και ανόργανων, όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό). Εξ αιτίας της πυκνής ατμόσφαιράς του, η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνειά του είναι περίπου 1.5 ατμόσφαιρες, δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από αυτήν της Γης.

Το διαστημόπλοιο Cassini, το οποίο εκτοξεύτηκε τον Οκτώβριο 1997, έφθασε στην περιοχή του Κρόνου τον Ιούλιο 2004 και ετέθη σε τροχιά γύρω από αυτόν. Τον Ιανουάριο 2005 μια μικρή αυτόματη άκατος (Huygens), που είχε αποσπασθεί από το διαστημόπλοιο, αφού διήλθε από την ατμόσφαιρα του Τιτάνα προσεδάφιστηκε στην επιφάνειά του με τη βοήθεια αλεξίπτωτου, μεταδίδοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο διαστημόπλοιο Cassini και από εκεί στη Γη, επί 90 περίπου λεπτά μετά την προσεδάφιση. Οι μετρήσεις (με τις 6 πειραματικές συσκευές με τις οποίες ήταν εξοπλισμένη η άκατος) έδειξαν ότι η πυκνή ατμόσφαιρα του Τιτάνα έχει ύψος τουλάχιστον 200 km και αποτελείται από 98.4% άζωτο και 1.6% μεθάνιο, το οποίο πρέπει να προέρχεται από την επιφάνεια του δορυφόρου. Επίσης περιέχει ίχνη υδρογονανθράκων από φωτοχημικές αντιδράσεις στην ανώτερη ατμόσφαιρα του. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του Τιτάνα είναι 94 K (-179 °C), επομένως δεν είναι δυνατόν να υπάρχει H₂O σε υγρή ή αέρια μορφή. Το Huygens, προσεδάφισθηκε στην ακτή μια μεγάλης περιοχής που χαρακτηρίστηκε ως *θάλασσα*, ενώ σε μικρή απόσταση φωτογραφήθηκαν λόφοι μικρού ύψους (~150 m). Στην άμεση περιοχή φωτογραφήθηκαν μικροί (d = ~20 cm) σφαιρικοί όγκοι, αποτελούμενοι πιθανόν από παγοκρυστάλλους.

Σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα, οι συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια του Τιτάνα είναι όμοιες με αυτές που επικρατούσαν στη Γη, κατά τα πρώτα στάδια της δημιουργίας της. Για το λόγο αυτό, ο Τιτάνας εξακολουθεί να αποτελεί στόχο για μελλοντικές διαστημικές αποστολές.

β) Εγκέλαδος

Ο **Εγκέλαδος** (Σχ. 5.6) είναι ο 6^{ος} μεγαλύτερος δορυφόρος του πλανήτη Κρόνου. Περιφέρεται γύρω από αυτόν σε απόσταση 238 000 km, δηλαδή όσο περίπου και η Σελήνη γύρω από τη Γη. Η τροχιά του συμπίπτει με τον εξωτερικό δακτύλιο E του πλανήτη, τον οποίο εμπλουτίζει με σωματίδια πάγου. Παρόλο που η διάμετρος του Εγκέλαδου είναι μόνο 500 km (το 1/7 της διαμέτρου της Σελήνης) και επομένως δεν αναμένεται να είναι τεκτονικά ενεργός, παρατηρήσεις με το διαστημόπλοιο Cassini



Σχήμα 5.6. Ο δορυφόρος του Κρόνου, Εγκέλαδος

(2005) επιβεβαίωσαν ότι από τη νότια πολική περιοχή του εξέρχονται ψυχροί πίδακες, η ενεργειακή προέλευση των οποίων είναι ακόμα άγνωστη. Οι πίδακες αυτοί εναποθέτουν ύλη στο νότιο ημισφαίριο του Εγκέλαδου, στο οποίο δεν παρατηρούνται κρατήρες (βλ. Σχ. 5.6).

Ο δορυφόρος αυτός του Κρόνου είναι το μικρότερο σώμα του ηλιακού συστήματος στο οποίο παρατηρείται ηφαιστειακή δραστηριότητα.

5.5 ΟΙ ΕΛΑΣΣΟΝΕΣ ΠΛΑΝΗΤΕΣ (ΑΣΤΕΡΟΕΙΔΕΙΣ)

Οι **ελάσσονες πλανήτες** (minor planets), που συνήθως αναφέρονται ως **αστεροειδείς** (asteroids), είναι μικρά κομμάτια πλανητικής ύλης που περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο. Παρόλο που η ονομασία *αστεροειδείς* είναι ατυχής (βλ. παρακάτω), την δεχόμαστε και, μετά από αυτήν τη διευκρίνηση, θα την χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια του Κεφαλαίου. Ο πρώτος αστεροειδής παρατηρήθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, αλλά οι αστρονόμοι είχαν αρχίσει να ψάχνουν γι' αυτούς από την εποχή που ο *Johann Titius* ανακάλυψε μια απλή αριθμητική σχέση που ακολουθούσαν οι αποστάσεις των πλανητών από τον Ήλιο.

Ο Titius βρήκε πως αν πάρουμε τους αριθμούς 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96 και 192 (που ο καθένας, αν εξαιρέσουμε το 0 και το 3, είναι διπλάσιος του προηγούμενου), προσθέσουμε σε καθέναν το 4 και διαιρέσουμε δια του 10, καταλήγουμε στην ακολουθία αριθμών 0.4, 0.7, 1, 1.6, 2.8, 5.2, 10 και 19.6. Συνειδητοποίησε πως η ακολουθία αυτή αντιπροσωπεύει την απόσταση των πλανητών από τον Ήλιο σε Αστρονομικές Μονάδες (AU). Πράγματι, η απόσταση του Ερμή από τον Ήλιο είναι 0.4 AU, της Αφροδίτης 0.7 AU, της Γης 1.0 AU, κ.ο.κ. Οι αριθμοί 2.8 και 19.6 δεν αντιστοιχούσαν σε κανένα γνωστό πλανήτη.

Ο Titius δημοσίευσε την ανακάλυψή του αυτή μόνο υπό μορφή σημείωσης σε κάποια Γερμανική μετάφραση ενός Γαλλικού επιστημονικού βιβλίου. Στην αστρονομική κοινότητα της εποχής έγινε γνωστή από τον *Johann Bode*, ένα νεαρό αστρονόμο που της έδωσε μεγάλη σημασία, και έτσι η ακολουθία αυτή έγινε γνωστή ως *νόμος του Bode* ή ως *νόμος των Titius–Bode*. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι, πρόσφατα, αποδείχθηκε πως η ακριβής ακολουθία που προβλέπει ο νόμος των Titius–Bode δεν έχει φυσική σημασία.

Όταν ο *William Herschel* ανακάλυψε τον Ουρανό το 1781, βρέθηκε ότι η απόσταση του (μεγάλος ημιάξονας: 19.2 AU) ταιριάζει στον αριθμό 19.6 του νόμου των Titius–Bode. Πριν όμως από αυτήν την ανακάλυψη, ο Bode είχε προτείνει ότι έπρεπε να υπάρχει ένας πλανήτης

ανάμεσα στον Άρη και το Δία, σε μέση απόσταση από τον Ήλιο 2.8 AU. Μετά την ανακάλυψη του Herschel η πρόταση αυτή αντιμετωπίστηκε σοβαρά.

Το 1785 ο Ούγγρος βαρόνος *Xavier von Zach* άρχισε να ψάχνει για τον "πλανήτη" που έλειπε. Παρά τις επίμονες προσπάθειές του δεν είχε καμιά επιτυχία στα 15 χρόνια που ακολούθησαν. Ακόμη και όταν οργάνωσε μια ομάδα εντατικής παρατήρησης το 1800, ο "χαμένος" πλανήτης δεν βρέθηκε. Σε μια τυχαία παρατήρηση, όμως, που έκανε το βράδυ της πρωτοχρονιάς του 1801 ο *Giuseppe Piazzi*, ο οποίος εκείνη την εποχή συνέτασσε έναν κατάλογο αστερών, ανακάλυψε έναν "πλανήτη" στη σωστή απόσταση από τον Ήλιο. Το σώμα αυτό ονομάστηκε **Δήμητρα** (*Ceres*), προς τιμήν της θεάς της γεωργίας και προστάτιδας της Σικελίας, γενέτειρας του Piazzi.

Μετά την ανακάλυψη της Δήμητρας, βρέθηκαν κι άλλοι αμυδροί "πλανήτες" που περιφέρονταν σε αποστάσεις από τον Ήλιο μεταξύ του Άρη και του Δία, η «κύρια ζώνη» των οποίων καταλαμβάνει το χώρο ενός δακτυλίου μεταξύ 2.0 και 4.2 AU. Όλοι τους έμοιαζαν με αστερία, επειδή ο δίσκος του ήταν πολύ μικρός για να μπορεί να ανιχνευθεί με τα όργανα που διέθεταν την εποχή εκείνη και, συνεπώς, έδιναν σημειακές εικόνες στο τηλεσκόπιο. Έτσι το 1802 επινοήθηκε ο (ατυχής) όρος *αστεροειδής* (*asteroid*) για να τους περιγράψει. Σήμερα είναι γνωστοί περισσότεροι από 20000, αλλά μόνο 33 έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 200 χιλιόμετρα.

Η κατανομή του μήκους του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς των αστεροειδών της κύριας ζώνης παρουσιάζει ορισμένα κενά, τα οποία ονομάζονται **διάκενα Kirkwood** (Kirkwood gaps) Αυτά τα διάκενα προκαλούνται κυρίως από τη βαρυτική επίδραση του Δία, εξ αιτίας της οποίας, μάλιστα, κανένας άλλος (μειζών) πλανήτης δεν δημιουργήθηκε στην περιοχή μεταξύ του Άρη και του Δία. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι μόνο σε τροχιές που απέχουν αρκετά από τους (μειζόνες) πλανήτες μπορούν οι πλανητοειδείς να παραμείνουν σε σχετικά ευσταθείς τροχιές. Αρκεί οι περίοδοι που προκύπτουν από το νόμο του Kepler να μην είναι ακέραια μικρά υποπολλαπλάσια των περιόδων των πλανητών.

Μερικοί αστεροειδείς έχουν συντονιστεί με την περίοδο περιφοράς του Δία (11.86 έτη) και τον συνοδεύουν στην κίνηση του γύρω από τον Ήλιο. Δεν είναι δορυφόροι του Δία, ώστε να περιφέρονται γύρω από τον ίδιο τον πλανήτη, αλλά περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο ακολουθώντας την ίδια τροχιά με τον πλανήτη. Οι αστεροειδείς αυτοί, που ονομάζονται *Τρωικοί* (προς τιμήν των ηρώων του Τρωικού πολέμου), είναι συγκεντρωμένοι γύρω από τα δύο σημεία ισορροπίας Lagrange (L_4 , L_5) του συστήματος Ήλιου-Δία. Η ύπαρξη των Τρωικών είχε προβλεφθεί από τον Lagrange κατά το τέλος του 18^{ου} αιώνα, ως η απλούστερη ευσταθής λύση του *προβλήματος των τριών σωμάτων*, και τα σημεία Lagrange L_4 και L_5 ορίζονται ως οι κορυφές των δύο ισοπλεύρων τριγώνων που σχηματίζονται, το καθένα, με άλλες δύο κορυφές τον Ήλιο και τον Δία. Η μια ομάδα των Τρωικών, η οποία έχει αστεροειδείς με ονόματα Ελλήνων, προηγείται του Δία κατά την περιφορά της περί τον Ήλιο κατά 60°, ενώ η άλλη, η οποία έχει αστεροειδείς με ονόματα Τρώων, έπεται κατά 60°. Ο πρώτος Τρωικός παρατηρήθηκε το 1906 και ήταν ο Αχιλλέας. Το 2000 ήταν γνωστοί 482 Έλληνες Τρωικοί (στο σημείο L_4) και 357 Τρώες Τρωικοί (στο L_5). Θεωρητικά, μερικοί από τους υπόλοιπους πλανήτες θα μπορούσαν να συνοδεύονται από αντίστοιχους Τρωικούς. Πρόσφατα (1990) ανακαλύφθηκε ο πρώτος Αρειανός Τρωικός, ο αστεροειδής *5261 Eureka*.

Το 5% περίπου των αστεροειδών έχουν πολύ έκκεντρες τροχιές, οι οποίες τέμνουν τις



Σχήμα 5.7 Ο αστεροειδής Έρωσ από απόσταση 1570 km

τροχιές ενός ή και περισσότερων πλανητών, συγκεκριμένα της Γης, του Άρη, του Δία ή του Κρόνου. Η τροχιά του *Χείρων* τέμνει ακόμα και την τροχιά του Ουρανού! Η μελέτη της κίνησης των αστεροειδών, των οποίων η τροχιά τέμνει την τροχιά των γήινων πλανητών, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι θα μπορούσαν να συντριβούν πάνω σε κάποιον από αυτούς. Η πιθανότητα μιας τέτοιας σύγκρουσης είναι, πάντως, πολύ μικρή. Οι αστεροειδείς που πλησιάζουν την Γη μας έχουν δώσει την ευκαιρία να πραγματοποιήσουμε ορισμένες πολύ χρήσιμες για την Αστρονομία παρατηρήσεις,

αφού είναι οι μοναδικοί που μπορούμε να μελετήσουμε από κοντά.

Στην κατηγορία των αστεροειδών που πλησιάζουν τη Γη ανήκει λ.χ. ο αστεροειδής *433 Έρωσ* (διαστάσεων $33 \times 13 \times 13$ km), με τη βοήθεια του οποίου έγινε ένας από τους πιο ακριβείς προσδιορισμούς της αποστάσεως Γης-Ήλιου, με τη μέθοδο της *ημερήσιας παράλλαξης*. Στις 14 Φεβρουάριου 2000 το διαστημόπλοιο *NEAR-Shoemaker* τέθηκε σε τροχιά γύρω από τον αστεροειδή αυτόν και στις 26 Οκτωβρίου 2000 πήρε φωτογραφίες από μικρή απόσταση (μέχρι 500 m!). Οι φωτογραφίες αποκάλυψαν την ύπαρξη κρατήρων στην επιφάνεια του Έρωτα καθώς επίσης και μεγάλο αριθμό βράχων διαμέτρου μεγαλύτερης από 1.2 μέτρα. Η παρατήρηση αυτή μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι ο αστεροειδής αυτός δεν δημιουργήθηκε από συνένωση πολλών μικρότερων σωμάτων, αλλά αποσπάστηκε από ένα μεγαλύτερο αντικείμενο.

Μερικοί χαρακτηριστικοί αστεροειδείς που πλησιάζουν επίσης τη Γη είναι ο *Ίκαρος*, ο *Γεωγράφος*, ο *Ερμής*, ο *Απόλλων*, ο *Αμορ* και ο *Άδωνις*. Οι αστεροειδείς αυτοί ονομάζονται *παραγήινοι αστεροειδείς* (Near Earth Asteroids - NEA). Οι τροχιές μερικών από αυτούς παρακολουθούνται συστηματικά, προκειμένου να προβλεφθεί κάποια πιθανή μελλοντική προσέγγισή τους στον πλανήτη μας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χημική σύσταση των αστεροειδών, δεδομένου ότι θεωρούνται μεταξύ των αρχαιότερων σωμάτων του ηλιακού συστήματος. Ο Πίνακας 5.3 δίδει τα στοιχεία μερικών από τους πιο γνωστούς αστεροειδείς.

Οι αστεροειδείς μοιάζουν με μικρούς βράχους και στη μεγάλη πλειοψηφία έχουν ακανόνιστα σχήματα ή είναι επιμήκη σώματα, όπως ακριβώς οι μικροί δορυφόροι του Άρη, ο Φόβος και ο Δείμος. Έχουν σχισμές καθώς και μικρούς και μεγάλους κρατήρες, που προκλήθηκαν από τη σύγκρουση τους με μικρότερα μεσοπλανητικά υπολείμματα. Η χρονολόγηση των κρατήρων, που έχουν παρατηρηθεί με αρκετή λεπτομέρεια στα σώματα του

ηλιακού συστήματος, δείχνει ότι υπήρξε μια φάση (στα αρχικά στάδια της ζωής του) κατά την οποία τα μεγάλα σώματα υπέστησαν έντονο βομβαρδισμό από θραύσματα αστεροειδών.

Οι αστεροειδείς αποτελούν μια κατηγορία μελών του πλανητικού μας συστήματος που θέτει πολλά ενδιαφέροντα προβλήματα στην Αστρονομία. Ένα από τα προβλήματα αυτά αναφέρεται στον τρόπο δημιουργίας τους. Παλαιότερα πιστεύαμε ότι οι αστεροειδείς αποτελούν τα κατάλοιπα ενός (μειζονος) πλανήτη, ο οποίος περιφερόταν γύρω από τον Ήλιο κατά μήκος μιας ελλειπτικής τροχιάς μεταξύ των τροχιών του Άρη και του Δία. Ο πλανήτης όμως αυτός, για κάποιο λόγο, θρυμματίστηκε και τα θραύσματά του εξακολουθούν να περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο με τη μορφή των αστεροειδών. Η άποψη αυτή όμως δεν γίνεται σήμερα δεκτή. Αντίθετα, κατά την επικρατέστερη σήμερα άποψη, οι αστεροειδείς δημιουργήθηκαν από ένα τμήμα του ίδιου νέφους που δημιούργησε το πλανητικό μας σύστημα. Στο τμήμα όμως αυτό, εξαιτίας των παρέλξεων του Δία (ο οποίος δημιουργήθηκε κατά τα πρώτα στάδια γένεσης του ηλιακού συστήματος), δεν συνεχίστηκε η διαδικασία προσαύξησης μάζας και δημιουργίας πλανήτη, όπως συνέβη με τα τμήματα από τα οποία δημιουργήθηκαν η Γη, ο Άρης, ο Κρόνος κλπ. Αντίθετα, το υλικό παρέμεινε διασκορπισμένο σε πλανητοειδείς, με αποτέλεσμα τα σώματα αυτά να δημιουργήσουν τους αστεροειδείς. Με την υπόθεση αυτή συνηγορεί το γεγονός ότι πολλοί αστεροειδείς έχουν μικρή πυκνότητα (γύρω στο 1 gr/cm³) και δεν είναι συμπαγείς, αλλά σαθροί. Η θεωρία αυτή αναφέρεται, φυσικά, στη δημιουργία της πλειοψηφίας των αστεροειδών, που οι τροχιές τους περιλαμβάνονται μεταξύ των τροχιών του Άρη και του Δία.

5.6 ΚΟΜΗΤΕΣ

5.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Ένα από τα πιο φαντασμαγορικά φαινόμενα του νυχτερινού ουρανού είναι σίγουρα ένας μεγάλος **κομήτης** (comet), με τη λαμπρή κεφαλή του και τη μεγάλη ουρά του. Σε καιρούς που επικρατούσε η αστρολογία και τα ουράνια φαινόμενα θεωρούνταν ότι ήταν οι προάγγελοι όσων έμελλε να συμβούν, οι κομήτες ήταν σημάδια επερχόμενης καταστροφής. Γι' αυτό και η περιστασιακή τους εμφάνιση προκαλούσε τον τρόμο στους ανθρώπους, μέχρι και τα τέλη του 16^{ου} και 17^{ου} αιώνα, οπότε μελετήθηκαν οι πορείες τους με αστρονομική ακρίβεια.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι κομήτες είναι λαμπροί, μόνο όταν περνούν από το κοντινότερο προς τον Ήλιο σημείο της τροχιάς τους, το **περιήλιο** (perihelion). Όταν βρίσκονται στο μακρινότερο από τον Ήλιο σημείο των έκκεντρων τροχιών τους, στο **αφήλιο** (aphelion), είναι πολύ μικροί και ανακλούν τόσο λίγο ηλιακό φως, ώστε παύουν να είναι ορατοί. Κατά συνέπεια, οι κομήτες είναι ορατοί σ' ένα μικρό μόνο τμήμα της τροχιάς τους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (§5.3), το πλανητικό μας σύστημα περιβάλλεται από ένα νέφος μικρών σωμάτων, που είναι δυνατό να εξελιχθούν σε κομήτες και είναι γνωστό ως *νέφος του Oort*. Η απόσταση του νέφους αυτού από τον Ήλιο υπολογίζεται ότι είναι της τάξεως των 50000 AU \approx 0.8 ετών φωτός (περίπου το ¼ της απόστασης του κοντινότερου αστέρα).



Σχήμα 5.8 Ο κομήτης West όπως φωτογραφήθηκε το 1975

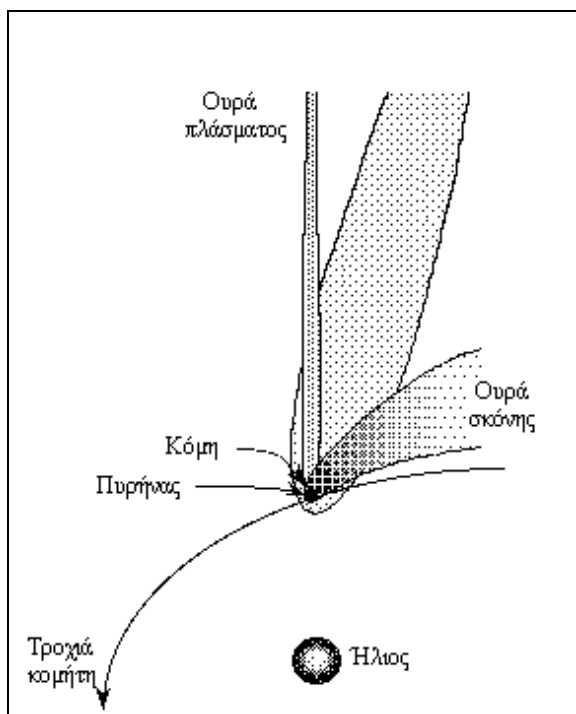
Οι κομήτες αποτελούνται από ύλη που πιθανότατα ανήκει στο αρχικό ηλιακό νεφέλωμα, η πρωταρχική σύνθεση της οποίας ήταν παγωμένα αέρια και σκόνη, σαν μια "**βρώμικη χιονόμπαλα**" (dirty snowball). Είναι σώματα πορώδη, μέσα στις κυψελίδες των οποίων υπάρχουν ουσίες οι οποίες υπό κανονικές συνθήκες πίεσεως και θερμοκρασίας βρίσκονται σε αερίωδη κατάσταση. Λόγω όμως των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στις μεγάλες αποστάσεις από τον Ήλιο, όπου βρίσκονται αρχικά οι κομήτες, η ύλη που είναι μέσα στις κυψελίδες των κομητών εμφανίζεται σε στερεά κατάσταση.

Λόγω των βαρυτικών παρέλξεων από άλλα σώματα του νέφους του Oort ή από γειτονικούς αστέρες, είναι δυνατόν ένας κομήτης να απομακρυνθεί από την αρχική τροχιά του και να αρχίσει να κινείται προς τυχαία διεύθυνση. Αν κινηθεί

προς τον Ήλιο, τότε αυξάνει η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Για το λόγο αυτό αυξάνει και η θερμοκρασία των επιφανειακών στιβάδων του κομήτη, με αποτέλεσμα να αρχίσουν να εξαερώνονται τα στερεοποιημένα αέρια που βρίσκονται μέσα στις κυψελίδες του. Κατά την εκτόνωση των αερίων αυτών θρυμματίζονται τα στερεά τοιχώματα των κυψελίδων και απελευθερώνεται σκόνη. Με τον τρόπο αυτόν, καθώς ο κομήτης πλησιάζει τον Ήλιο, δημιουργείται γύρω του ένα νέφος που αποτελείται από τα αέρια και τη σκόνη. Το περίβλημα αυτό καλείται **κόμη** (coma) του κομήτη, ενώ το αρχικό σώμα αποτελεί τον **πυρήνα** (nucleus) του κομήτη (Σχήμα 5.9). Ο πυρήνας και η κόμη μαζί αποτελούν την **κεφαλή** (head) του κομήτη.

Καθώς ένας κομήτης πλησιάζει προς τον Ήλιο, οι διαστάσεις της κόμης του αυξάνουν, όταν δε φθάσει σε απόσταση μικρότερη από 5 AU από τον Ήλιο σχηματίζεται η **ουρά** του (tail). Οι ουρές των κομητών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) στις ουρές του τύπου I (**ουρές πλάσματος ή ιόντων** – ion tails), που έχουν σχήμα ευθύγραμμο και διευθύνονται κατά την προέκταση της επιβατικής ακτίνας που συνδέει τον Ήλιο με τον κομήτη και β) στις ουρές του τύπου II (**ουρές σκόνης** – dust tails), που έχουν σχήμα καμπύλο. Πρέπει να σημειωθεί, ότι συχνά εμφανίζεται το φαινόμενο ο ίδιος κομήτης να αναπτύξει ταυτόχρονα δύο ουρές, μία του τύπου I και μία του τύπου II (Σχήματα 5.8 και 5.9).

Σήμερα γνωρίζουμε ότι η ανάπτυξη της ουράς των κομητών οφείλεται στην πίεση που εξασκεί ο ηλιακός άνεμος (δηλαδή το ρεύμα των σωματιδίων που συνεχώς εκπέμπει ο Ήλιος) πάνω στο υλικό που εξαερώθηκε από τον κομήτη. Η καμπύλη ουρά (*ουρά σκόνης*) οφείλεται σε σωματίδια σκόνης και πάγου, σχετικά μεγάλης μάζας, τα οποία, λόγω της μικρής σχετικής ταχύτητας τους ως προς την κεφαλή του κομήτη, παραμένουν πλησίον της περιοχής που παρήχθησαν και επομένως διαγράφουν την καμπύλη τροχιά του κομήτη γύρω από τον Ήλιο. Το μήκος της ουράς σκόνης μπορεί να φτάσει μερικές δεκάδες εκατομμυρίων χιλιόμετρα. Η ευθύγραμμη ουρά (*ουρά πλάσματος*) οφείλεται στην παγίδευση μοριακών ιόντων της κόμης (κυρίως μονοξειδίου του άνθρακα) από το μαγνητικό πεδίο του ηλιακού ανέμου. Το μήκος της ουράς πλάσματος είναι δυνατόν να φτάσει τις μερικές εκατοντάδες εκατομμυρίων χιλιόμετρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι παλαιότερα νομίζαμε ότι ο σχηματισμός της ευθύγραμμης ουράς των κομητών οφειλόταν στην πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας. Σήμερα όμως γνωρίζουμε ότι η δύναμη αυτή παίζει εντελώς δευτερεύοντα ρόλο στο σχηματισμό αυτού του είδους της ουράς



Σχίμα 5.9 Τα χαρακτηριστικά μέρη ενός κομήτη

Οι κομήτες, αφού διέλθουν δια του περιηλίου της τροχιάς τους, αρχίζουν να απομακρύνονται και πάλι από τον Ήλιο, οπότε επαναλαμβάνονται τα παραπάνω φαινόμενα κατά την αντίστροφη φορά. Πρώτα, δηλαδή, ο κομήτης χάνει την ουρά του, στη συνέχεια διαχέεται η ύλη της κόμης ή συμπυκνώνεται και πάλι στην επιφάνεια του πυρήνα και έτσι απομένει και πάλι μόνον ο πυρήνας του. Όμως, η τελική μάζα του πυρήνα είναι μικρότερη από την αρχική, λόγω της απώλειας του τμήματος εκείνου, το οποίο τροφοδότησε τη δημιουργία της κόμης και της ουράς του κομήτη. Εάν η τροχιά του κομήτη τέμνει την τροχιά της Γης, τότε κάθε φορά που η Γη διέρχεται από το σημείο τομής (γεγονός που συμβαίνει μια ή δύο φορές το χρόνο) εμφανίζεται το θαυματικό φαινόμενο της βροχής **των διαττόντων αστερών** (meteor

showers). Καθώς το υλικό από την κόμη του κομήτη εισέρχεται με μεγάλη ταχύτητα (>20 km/s) στην ατμόσφαιρα της Γης, θερμαίνεται από την τριβή, πυρακτώνεται και αφήνει πίσω του ένα φωτεινό ίχνος, που, λανθασμένα αποδίδεται από τους αδαείς σε ένα «αστέρι που πέφτει»! Η διάμετρος των σωματιδίων στα οποία οφείλονται οι διάττοντες αστέρες έχουν τυπική διάμετρο πολύ μικρότερη από ένα εκατοστό (συνήθως περίπου όση ενός κόκκου άμμου).

Υπό κανονικές συνθήκες, ένας κομήτης αποσπάται από το νέφος του Oort, εκτελεί μια εμφάνιση στην εσωτερική περιοχή του ηλιακού συστήματος, και ακολούθως επανέρχεται και πάλι στο νέφος του Oort. Ενδέχεται όμως στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο κομήτης διέρχεται από την εσωτερική περιοχή του ηλιακού συστήματος, να πλησιάσει αρκετά προς ένα πλανήτη, οπότε οι βαρυτική έλξη του πλανήτη είναι δυνατό να μεταβάλει την τροχιά του κομήτη, έτσι ώστε από σχεδόν παραβολική, που ήταν αρχικά, να γίνει ελλειπτική, δηλαδή

κλειστή. Στην περίπτωση αυτή, συνεπώς, ο κομήτης «αιχμαλωτίζεται» πλέον και ακολουθεί ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, μεταβάλλεται, δηλαδή, όπως λέγουμε, σε έναν *περιοδικό κομήτη*. Επίσης, είναι δυνατόν, κατά την προσέγγιση ενός κομήτη προς έναν πλανήτη ή και τον Ήλιο, να αναπτυχθούν τόσο έντονες παλιρροιογόνες δυνάμεις, ώστε να προκληθεί διάλυση του πυρήνα του κομήτη, οπότε ο κομήτης μεταβάλλεται σε ένα *σμήνος μετεωροειδών*. Το διαστημικό τηλεσκόπιο *SOHO* (*Solar and Heliospheric Observatory*) από το 1995 που εκτοξεύθηκε μέχρι σήμερα (2014) έχει καταγράψει κατά μέσο όρο την πτώση ενός (συνήθως μικρού) κομήτη στον Ήλιο κάθε 3-4 ημέρες.

Οι περιοδικοί κομήτες διακρίνονται, συνήθως, σε δύο ομάδες, δηλαδή στους *περιοδικούς κομήτες βραχείας περιόδου*, των οποίων η περίοδος είναι μικρότερη από 150 έτη, και τους *περιοδικούς κομήτες μακράς περιόδου*, των οποίων η περίοδος είναι μεγαλύτερη των 150 ετών.

Τα στοιχεία της τροχιάς ενός κομήτη δεν παραμένουν σταθερά, αλλά μεταβάλλονται εν γένει με το χρόνο. Οι μεταβολές αυτές είναι διαφορετικής φύσεως για τους διάφορους κομήτες. Έτσι λ.χ. η περίοδος του κομήτη του Encke, ο οποίος είναι περιοδικός κομήτης βραχείας περιόδου, ελαττώνεται διαρκώς με έναν ρυθμό της τάξεως των 2.5 ημερών ανά αιώνα. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται, συνήθως, στις παρέλξεις που δημιουργούνται κατά την κίνηση του κομήτη δια μέσου της ζώνης των αστεροειδών. Κατά πολύ δραστικότερες όμως είναι οι μεταβολές που υφίστανται τα στοιχεία της τροχιάς ενός κομήτη, όταν συμβεί να διέλθει κοντά από τους μεγάλους πλανήτες. Έτσι λ.χ., η περίοδος του κομήτη του Brooks μειώθηκε από 29 σε 7 έτη, λόγω της διέλευσής του σε μικρή απόσταση από τον Δία κατά το έτος 1886, ενώ του κομήτη Hale-Bopp μεταβλήθηκε από 4200 σε 2380 χρόνια κατά την πρόσφατη διέλευσή του από το περιήλιο της τροχιάς του, το 1997.

Παράλληλα με την κίνηση των κομητών γύρω από τον Ήλιο, οι επιστήμονες μελέτησαν προσεκτικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τη χημική σύσταση και τη φυσική κατάσταση των σωμάτων αυτών. Με τον τρόπο αυτόν βρέθηκε ότι η διάμετρος του πυρήνα των κομητών κυμαίνεται μεταξύ 1-100 km, με μια μέση τιμή της τάξης των 10 km, η δε μάζα τους μεταξύ 10^{14} - 10^{20} gr, με μια μέση τιμή ίση προς 10^{18} gr. Πρόκειται δηλαδή για πολύ μικρά αντικείμενα, συγκρινόμενα με τη μάζα της Γης ($\sim 6 \times 10^{27}$ gr). Η διάμετρος της κόμης ενός κομήτη μεταβάλλεται με την απόσταση του κομήτη από τον Ήλιο. Το ίδιο συμβαίνει και με το μήκος της ουράς ενός κομήτη. Για παράδειγμα η μέση τιμή του μήκους της ουράς ενός κομήτη που είναι ορατή με γυμνό μάτι είναι της τάξης των 10^5 - 10^6 km, όπως, όμως αναφέρθηκε παρά πάνω, σε ορισμένες όμως περιπτώσεις το μήκος της ουράς πλάσματος μπορεί να υπερβεί τα 150×10^6 km.

5.6.2 Ο κομήτης του Halley

Ο περισσότερο γνωστός από όλους τους κομήτες είναι, ασφαλώς, ο *κομήτης του Halley*. Οι πρώτες πληροφορίες για την εμφάνιση του κομήτη αυτού ανάγονται στο έτος 240 π.Χ. Ο κομήτης έλαβε το όνομά του προς τιμήν του Άγγλου αστρονόμου Halley, ο οποίος απέδειξε ότι οι τρεις κομήτες που είχαν παρατηρηθεί κατά τα έτη 1531, 1607 και 1682 δεν ήταν παρά οι διαδοχικές εμφανίσεις του ίδιου περιοδικού κομήτη και συγχρόνως προέβλεψε ότι η επόμενη εμφάνισή του θα συνέβαινε το 1758. Η τελευταία διάβαση του κομήτη του Halley από το περιήλιο της τροχιάς του έλαβε χώρα στις 9 Φεβρουαρίου 1986, οπότε σχεδιάστηκε μια σειρά επιστημονικών πειραμάτων τόσο με επίγειες παρατηρήσεις όσο και με διαστημικές αποστολές. Έξι διαστημόπλοια ετέθησαν σε κατάλληλες τροχιές για να πλησιάσουν και να παρατηρήσουν τον κομήτη πριν από τη διάβασή του από το περιήλιο της τροχιάς του. Αυτά ήταν: α) το

διαστημόπλοιο ICE, που με την ονομασία ISEE-3 είχε εκτοξευθεί από τις ΗΠΑ το 1978 στο σημείο Lagrange L₁ για να παρατηρεί τον ηλιακό άνεμο, β) τα διαστημόπλοια *Vega-1* και *Vega-2*, που εκτοξεύτηκαν το 1984 από την τότε Ένωση Σοβιετικών Σοσιαλιστικών Δημοκρατιών (ΕΣΣΔ), γ) τα διαστημόπλοια *Suisei* και *Sakigake*, που εκτοξεύτηκαν το 1985 από την Ιαπωνία και δ) το διαστημόπλοιο *Giotto*, που εκτοξεύτηκε το 1985 από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Ερευνών του Διαστήματος (European Space Agency – ESA). Η συντονισμένη αυτή μελέτη κατέληξε στη φωτογράφιση του πυρήνα του κομήτη από το διαστημόπλοιο Giotto στις 14 Μαρτίου του 1986 και στη συλλογή στοιχείων τόσο για τη χημική σύσταση των κομητών όσο και για το μηχανισμό παραγωγής της κόμης και της ουράς των κομητών. Η επόμενη διάβαση του κομήτη του Halley από το περιήλιο θα λάβει χώρα στις 28 Ιουλίου 2061.

	Ερμής	Αφροδίτη	Γη	(Σελήνη)	Αρης	Δίας	Κρόνος	Ουρανός	Ποσειδών	Ήλιος
Μεγάλος ημιάξονας (AU)	0.387	0.723	1.000	-	1.524	5.202	9.555	19.218	30.109	-
Περίοδος περιφοράς	87.66 ^d	226.46 ^d	365.256 ^d	27.32 ^d	1.88 ^y	11.86 ^y	29.46 ^y	84.01 ^y	164.79 ^y	-
Περίοδος περιστροφής	43.67 ^d	-243.01 ^d	23.93 ^h	27.32 ^d	24.62 ^h	9.92 ^h	10.66 ^h	17.24 ^h	16.11 ^h	25.38 ^d
Ισημερινή ακτίνα, km	2 439	6 052	6 378	1 738	3 397	71 492	60 268	25 559	24 764	695 990
Μάζα, M (M _⊕)	0.06	0.82	1.00	0.012	0.11	317.89	95.18	14.54	17.15	332 946
Μέση πυκνότητα gr/cm ³	5.44	5.25	5.52	3.34	3.94	1.33	0.69	1.27	1.64	1.41
Ταχύτητα διαφυγής km/sec	4.3	10.3	11.2	2.37	5.0	59.5	35.6	21.2	23.6	617.7
Ανώτερη θερμοκρασία °C	350	480	58	107	27	29 700 ^b	93 ^a	730	470	1.5×10 ⁷
Κατώτερη θερμοκρασία °C	-170	-33 ^a	-88	-153	-123	-95 ^a	-180 ^a	-210 ^a	-220 ^a	5 800
Ατμόσφαιρα (κύρια αέρια)	-	CO ₂ , N ₂	N ₂ , O ₂	-	CO ₂ , N ₂	H ₂ , He	H ₂ , He	H ₂ , He	H ₂ , He	H ₂ , He
Δορυφόροι	0	0	1	-	2	26+ δακτύλιοι	18+ δακτύλιοι	21+ δακτύλιοι	8	9 πλανήτες
Εκκεντρότητα τροχιάς (e)	0.2056	0.0068	0.0167	0.055	0.0933	0.048	0.056	0.046	0.010	-
Λόξωση (μοίρες)	0	2.12	23.45	1.54	23.98	3.08	26.73	97.92	28.8	7.3
Κλίση τροχιάς ως προς την εκλειπτική (μοίρες)	7.0	3.39	0.0	5.15	1.85	1.30	2.49	0.77	1.77	-

Πίνακας 5.1. Τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά των κύριων σωμάτων του ηλιακού συστήματος
Υπόμνημα: d: μέρες, h: ώρες, y: έτη, a: κορυφή της ατμόσφαιρας, b: πυρήνας

Πίνακας 5.2 Οι κυριότεροι δορυφόροι του Ηλιακού Συστήματος

Δορυφόρος	Στοιχεία τροχιάς				Ακτίνα [km]	Μάζα [% μάζας πλανήτη]	Μέση πυκνότητα [g/cm ³]
	Μεγάλος ημιάξονας [km]	Περίοδος [d m s]	Εκκεντρό- τητα	Κλίση [°]			
Δορυφόροι του Ερμή							
Δεν έχει δορυφόρους							
Δορυφόροι της Αφροδίτης							
Δεν έχει δορυφόρους							
Δορυφόροι της Γης							
Σελήνη	384 400	27 07 43	0.055	18 – 29	1738	1.230002	3.34
Δορυφόροι του Άρη							
1 Φόβος	9 378	00 07 39	0.015	1.1	14×11×9	1.5×10 ⁻⁶	1.95
2 Δείμος	23 459	01 06 18	0.0005	0.9 – 2.7	8×6×6	3×10 ⁻⁷	2
Δορυφόροι του Δία							
XVI Metis	127 960	00 07 04			20	0.5×10 ⁻⁸	
XV Adrastea	128 980	00 07 06			13×10×8	0.1×10 ⁻⁸	
V Αμάλθεια	180 000	00 11 57	0.003	0.4	135×83×75	38×10 ⁻⁸	
XIV Θήβη	222 000	00 16 11	0.015	0.8	55×45	4×10 ⁻⁸	
I Ιώ	422 000	01 18 28	0.004	0.0	1815	4.68×10 ⁻³	3.5
II Ευρώπη	671 000	03 13 14	0.009	0.5	1569	2.52×10 ⁻³	3.0
III Γανυμήδης	1 070 000	07 03 43	0.002	0.2	2631	7.80×10 ⁻³	1.9
IV Καλλιστώ	1 883 000	16 16 32	0.007	0.5	2400	5.66×10 ⁻³	1.8
XIII Λήδα	11 094 000	240 00 00	0.148	26.1	8	0.03×10 ⁻⁸	
VI Himalia	11 480 000	251 00 00	0.158	27.6	90	50×10 ⁻⁸	
X Λυσισθέα	11 720 000	260 00 00	0.107	29.0	20	0.4×10 ⁻⁸	
VII Elara	11 740 000	260 00 00	0.207	24.8	40	4×10 ⁻⁸	
XII Ananke	21 200 000	671 00 00R	0.169	147	15	0.2×10 ⁻⁸	
XI Carme	22 600 000	692 00 00R	0.207	164	20	0.5×10 ⁻⁸	
VIII Πασιφάη	23 500 000	735 00 00R	0.378	145	20	1×10 ⁻⁸	
IX Σινόπη	23 700 000	758 00 00R	0.275	153	20	0.4×10 ⁻⁸	
Δορυφόροι του Κρόνου							
Παν	133 583	00 13 48			9.66	8×10 ⁻¹⁰	
15 Άτλας	137 640	00 14 27	0.000	0.3	20×15		
16 Προμηθέας	139 353	00 14 43	0.003	0.003	73×43×33		0.7
17 Πανδώρα	141 700	00 15 05	0.004	0.0	57×42×31		0.7
11 Επιμηθέας	151 422	00 16 40	0.009	0.34	72×54×49		0.7
10 Ιανός	151 472	00 16 40	0.007	0.14	98×96×75		0.67
1 Mimas	185 520	00 22 37	0.020	1.5	196	8×10 ⁻⁶	1.2
2 Εγκέλαδος	238 000	01 08 32	0.005	0.0	250	1.3×10 ⁻⁵	1.1
3 Tethys	294 700	01 22 15	0.000	1.9	530	1.3×10 ⁻⁴	1.0
13 Τελεστό	294 700	01 22 15			17×14×13		
14 Καλυψώ	294 700	01 22 15			17×11×11		
4 Διώνη	377 400	02 17 36	0.002	0.0	560	1.9×10 ⁻⁴	1.4
12 Ελένη	377 400	02 17 45	0.005	0.0	18×16×15		
5 Ρέα	527 000	04 12 16	0.001	0.4	765	4.4×10 ⁻⁴	1.3
6 Τιτάν	1 221 800	15 21 51	0.029	0.3	2575	2.4×10 ⁻²	1.9
7 Υπερίων	1 481 000	21 06 45	0.104	0.4	205×130×110	3×10 ⁻⁶	1.9
8 Ιάπετος	3 561 300	79 03 43	0.028	14.7	730	3.3×10 ⁻⁴	1.2
9 Φήβη	12 952 000	549 03 33	0.163	177	110	7×10 ⁻⁸	

Πίνακας 5.2 Οι δορυφόροι του Ηλιακού Συστήματος (συνέχεια)

Δορυφόρος	Στοιχεία τροχιάς				Ακτίνα [km]	Μάζα [% μάζας πλανήτη]	Μέση πυκνότητα [g/cm ³]
	Μεγάλος ημιάξονας [km]	Περίοδος περιφοράς [d m s]	Εκκεντρό- τητα	Κλίση [°]			
Δορυφόροι του Ουρανού							
Cordelia	49 771	00 08 02	<0.001	0.3	25		
Ophelia	53 796	00 09 02	0.01	<0.5	25		
Bianca	59 173	00 10 25	<0.001	0.2	25		
Cressida	61 777	00 11 07	<0.0001	0.2	30		
Desdemona	62 676	00 11 22	<0.0001	0.2	30		
Juliet	64 352	00 11 50	0.001	<0.2	40		
Portia	66 085	00 12 19	<0.005	<0.2	40		
Rosalind	69 942	00 11 54	<0.0005	0.4	30		
Belinda	75 258	00 14 57	<0.003	0.1	25		
Puck	86 000	00 18 17	<0.0003	0.3	85		
5 Miranda	129 783	01 09 56	0.003	3.4	240	0.2×10 ⁻³	1.26
1 Ariel	191 239	02 12 29	0.003	4.2	579	1.8×10 ⁻³	1.65
2 Umbriel	265 969	04 03 27	0.005	0.4	586	1.2×10 ⁻³	1.44
3 Titania	435 844	08 16 56	0.0002	0.1	790	6.8×10 ⁻³	1.59
4 Oberon	582 596	13 11 07	0.001	0.1	762	6.9×10 ⁻³	1.50
Δορυφόροι του Ποσειδώνα							
Ναιάδα	48 230	00 07 00			25		
Θάλασσα	50 070	00 07 30			40		
Δέσποινα	52 530	00 08 00			75		
Γαλάτεια	61 950	00 10 00			90		
Λάρισα	73 550	00 13 00			95		
Πρωτέας	117 640	00 27 00			200		
Τρίτων	354 800	05 21 03R	10 ⁻⁵	157	1350	0.1	2.07
Νηρηίδα	5 513 360	360 05 00	0.75	7.2	170	2×10 ⁻⁵	2.03
Δορυφόροι του Πλούτωνα							
Χάρων	19 405	06 09 17R	0	96.6	590	8	

Πίνακας 5.3 Στοιχεία των κυριότερων μικρών πλανητών

Αστεροειδής	Στοιχεία τροχιάς				Μάζα [g]	Ακτίνα [km]	Περίοδος περιστροφής [h]
	Μεγάλος ημιάξονας [AU]	Περίοδος περιφοράς [ημέρες]	Εκκεντρό- τητα	Κλίση [°]			
1 Δήμητρα	2.767	1681	0.078	10.6	100×10^{22}	473	9.08
2 Παλλάς	2.772	1686	0.234	34.8	25×10^{22}	292	7.88
3 Juno	2.668	1592	0.258	13.0	2×10^{22}	125	7.21
4 Vesta	3.361	1325	0.089	7.1	20×10^{22}	278	5.34
5 Astraea	2.58		0.19	5.3		58	16.81
6 Ήβη	2.426	1380	0.202	14.8	20×10^{21}	103	7.27
7 Ίρις	2.386	1347	0.229	5.5	15×10^{21}	111	7.14
8 Φλόρα	2.20		0.16	5.9		80	13.60
9 Metis	2.39		0.12	5.6		84	5.06
10 Υγεία	3.134	2027	0.120	3.8	60×10^{21}	222	18.00
15 Ευνομία	2.643	1570	0.185	11.8	40×10^{21}	136	6.08
16 Ψυχή	2.923	1825	0.134	3.1	40×10^{21}	125	4.30
433 Έρως	1.458	643	0.223	10.8	5×10^{18}	10	5.27
588 Αχιλλέας	5.18		0.15	10.3		35	
624 Έκτωρ	5.16		0.03	18.3		115	6.92
944 Hidalgo	5.85		0.66	42.4		15	10.06
1566 Ίκαρος	1.078	409	0.827	22.9	5×10^{15}	1	2.27
1620 Γεωγράφος	1.245	507	0.335	13.3	5×10^{16}	1.5	5.23
1862 Απόλλων	1.471	652	0.560	6.4	2×10^{15}	1.3	
2060 Χείρων	1.47		0.38	6.9		160	
2101 Άδωνις	1.875	938	0.764	1.4	5×10^{13}	0.3	