

ΜΕΡΟΣ Α

ΟΙ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

1

Η ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ
ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

2

Η ΗΛΙΟΚΕΝΤΡΙΚΗ
ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΚΟΠΕΡΝΙΚΟΥ

3

ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΦΥΣΗ
ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

4

ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΟΥ ΚΕΠΛΕΡ

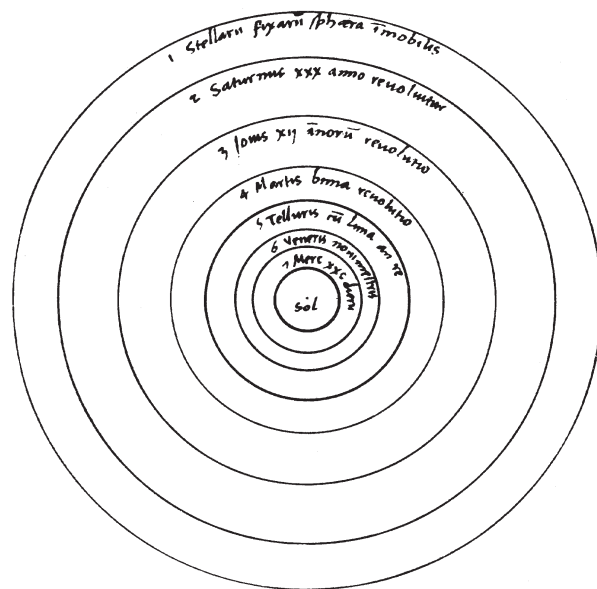
5

Ο ΓΑΛΙΛΑΙΟΣ
ΚΑΙ Η ΝΕΑ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ

ΟΙ ΑΠΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

Ο σκοπός μας σε αυτό το βιβλίο είναι να εξερευνήσουμε την ανάπτυξη και το περιεχόμενο των κυριοτέρων ιδεών που έχουν συμβάλει στην κατανόηση του φυσικού σύμπαντος. Αν και το μεγαλύτερο μέρος του βιβλίου ασχολείται με τη Φυσική, θα ξεκινήσουμε από την Αστρονομία για αρκετούς λόγους.

Οι μέθοδοι της επιστήμης έγιναν ίσως για πρώτη φορά αντικείμενο συνειδητής σκέψης, όταν οι άνθρωποι προσπάθησαν να αναγάγουν τη φαινομενικά χαοτική αλλά επαναλαμβανόμενη κίνηση των άστρων, του Ήλιου, της Σελήνης και των πλανητών σε ένα σύστημα με τάξη. Δεύτερον, πολλές από τις καθοδηγητικές επιστημονικές ιδέες μας προέρχονται από πρώιμα αστρονομικά συστήματα, όχι μόνο σε μεθοδολογικό επίπεδο αλλά και όσον αφορά συγκεκριμένες έννοιες, όπως αυτές του χρόνου και του χώρου, της δύναμης και της κίνησης. Όπως θα διαπιστώσουμε, ένα συνεχές ιδεών οδηγεί από τις πρώιμες και αφελείς υποθέσεις σχετικά με τις αστρικές κινήσεις κατευθείαν στην επιστήμη του 20ού αιώνα. Η εξέλιξη αυτή είναι παράλληλη με τη διεύρυνση της αντίληψής μας για το σύμπαν, από την ιδέα ενός κοντινού ουρανού στην ιδέα μιας περιστρεφόμενης ουράνιας σφαίρας, στην αναγνώριση του ηλιακού συστήματος ως μέρους ενός τεράστιου γαλαξία και, τέλος, στην αντίληψη του σύμπαντος ως αποτελούμενου



από αναρίθμητους γαλαξίες διασκορπισμένους σε απέραντο χώρο. Τρίτον, η επεξεργασία του αστρονομικού κοσμικού συστήματος οφείλεται σε πολλούς από τους ανθρώπους που είναι υπεύθυνοι για την ισχύ και το περιεχόμενο της σύγχρονης φυσικής θεωρίας. Η θέση τους στην επιστήμη και η ατμόσφαιρα της εποχής τους αποτελούν μέρος της ιστορίας μας. Τέταρτον, το πνευματικό έργο που θα συζητηθεί – τα πλανητικά συστήματα, ο νόμος της παγκόσμιας έλξης – άσκησε βαθύτατη επιρροή στον Δυτικό πολιτισμό. Για παράδειγμα, χωρίς την κατανόηση της νευτώνειας επανάστασης και του πλαισίου της, δεν μπορεί κανείς να ελπίζει στην πλήρη κατανόηση των αναστατώσεων που χαρακτηρίζουν την ιστορία του 18ου αιώνα, της εξέλιξης των νεό-

τερων οικονομικών ή πολιτικών θεωριών ή των φιλοσοφιών του Λοκ (Locke), του Μπέργκεϋ (Berkeley) και του Χιουμ (Hume). Τέλος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρούσα ευκαιρία για να παρακολουθήσουμε την άνοδο και την πτώση ορισμένων φυσικών θεωριών, να αναλύσουμε τη δομή τους και να οξύνουμε τις δεξιότητές μας να διακρίνουμε τις θεωρίες που είναι χρήσιμες και εκείνες που είναι παραπλανητικές. Επομένως, η προσεκτική εξέταση αυτού του θέματος δεν θα μας αποκαλύψει μόνο καινούργιους και σημαντικούς φυσικούς νόμους, αλλά θα μας δώσει μια ευκαιρία να επισκοπήσουμε όλες εκείνες τις άλλες πλευρές της φυσικής επιστήμης, οι οποίες, αν και σημαντικές, παραμένουν συχνά απροσπέλαστες.

Κεφάλαιο 1

Η ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

1.1 ΟΙ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΣΤΡΩΝ, ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΛΑΝΗΤΩΝ

Αν και σήμερα διαθέτουμε άφθονες μαρτυρίες ότι πολιτισμοί σε προηγούμενες εποχές και σε άλλα μέρη του κόσμου είχαν ήδη συλλέξει σημαντικά ψήγματα αστρονομικής και μαθηματικής γνώσης, μπορούμε να ανιχνεύσουμε τις απαρχές της επιστήμης, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα, στον ευφάνταστο νου των μεγάλων αρχαίων Ελλήνων στοχαστών. Για να αποκτήσουμε μια συγκεκριμένη αφετηρία, ας προσπαθήσουμε να φανταστούμε τον εαυτό μας στη θέση της ηγετικής επισημονικής κοινότητας του αρχαίου κόσμου γύρω στα 400 π.Χ., στην Αθήνα.

Αν και η χρήση οπτικών οργάνων ακριβείας απείχε ακόμη 2000 χρόνια, η απλή παρατήρηση του νυκτερινού ουρανού είχε ήδη γύρω στα 400 π.Χ. εξακριβώσει αρκετά δεδομένα και ερμηνείες σχετικά με την κίνηση του ουρανού, ώστε να στηριχθούν διάφορες αστρονομικές θεωρίες. Οι απλανείς αστέρες, δηλαδή τα «σταθερά» άστρα, και ο Γαλαξίας, κινούνται φαινομενικά κατά τη διάρκεια της νύκτας σαν να ήταν προσκολλημένα σε ένα αόρατο δοχείο που περιστρέφεται γύρω από ένα σταθερό κέντρο στον ουρανό (που ονομάζεται σήμερα *Βόρειος Ουράνιος Πόλος*). Από παρατηρήσεις που είχαν γίνει σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας της Γης, μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι

αυτό το δοχείο μοιάζει περισσότερο με μια πολύ μεγάλη σφαίρα που περιβάλλει τη Γη και ότι η ίδια η Γη είναι μια σφαίρα*. Όπως θα δούμε στο Υποκεφάλαιο 1.3, ένας σχετικά ακριβής υπολογισμός του μεγέθους της Γης ήταν ήδη δυνατός τον 3ο π.Χ. αιώνα. Ωστόσο, ακόμη και ο προσεγγιστικός υπολογισμός της απόστασης κάποιων αστερών από τη Γη δεν ήταν δυνατός μέχρι τον 19ο μ.Χ. αιώνα.

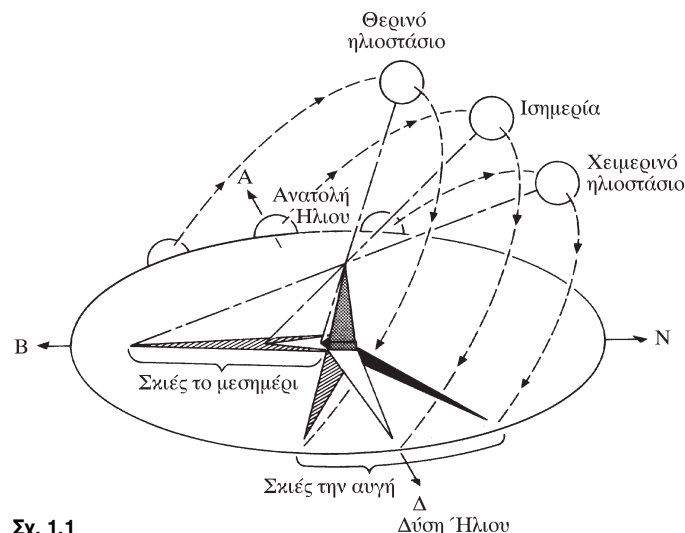
Οι αρχαίοι Έλληνες ήταν εξοικειωμένοι με το γεγονός ότι η υποθετική «ουράνια σφαίρα» που περιέχει τα άστρα φαίνεται να περιστρέφεται ομοιόμορφα από την Ανατολή προς τη Δύση, επιστρέφοντας στο αρχικό σημείο κάθε 24 ώρες. Η κίνηση αυτή ονομάζεται *ημερησία* περιστροφή. Φυσικά σήμερα γνωρίζουμε ότι είναι η Γη, και όχι τα άστρα, που περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της κάθε 24 ώρες, και ότι η εικόνα των άστρων ως τοποθετημένων σε μια μεγάλη σφαίρα αποτελεί ψευδαίσθηση. Αλλά αυτό δεν είναι κάτι που πρέπει απλώς να αποδεχθείτε «λόγω αυθεντίας». Αντιθέτως, πρέπει να εξετάσετε προσεκτικά ποιες από τις ακόλουθες παρατηρήσεις μπορούν να εξηγηθούν εξί-

* Εδώ, όπως και σε άλλα σημεία, η εξαιρετικά σύντομη περιήληψη της πρώιμης Αστρονομίας που παρουσιάζεται στο παρόν βιβλίο μπορεί να συμπληρωθεί με κάποια από τα βιβλία και τα άρθρα που περιλαμβάνονται στη Βιβλιογραφία στο τέλος του κεφαλαίου.

σου καλά υποθέτοντας είτε ότι τα άστρα κινούνται είτε ότι η Γη κινείται.

Υπάρχει ένα συγκεκριμένο άστρο, που ονομάζεται *Πολικός Αστέρας*, το οποίο τυχαίνει να βρίσκεται τώρα πολύ κοντά στον *Βόρειο Ουράνιο Πόλο* (το φαινόμενο κέντρο περιστροφής των άστρων στο βόρειο ημισφαίριο). Στα 400 π.Χ., όμως, ο Πολικός Αστέρας ήταν αρκετές μοίρες μακριά από τον Βόρειο Ουράνιο Πόλο· εκείνη την εποχή δεν υπήρχε ένας προφανής Πολικός Αστέρας. Οι αρχαίοι Έλληνες γνώριζαν ότι ο Βόρειος Ουράνιος Πόλος κινείται πολύ αργά σε σχέση με τα άστρα, δημιουργώντας το φαινόμενο της *μετάπτωσης των ισημεριών* (βλ. παρακάτω)· αλλά οι διαθέσιμες παρατηρήσεις δεν κάλυπταν ένα χρονικό διάστημα αρκετό, ώστε να γίνει κατανοητή η ακριβής φύση αυτής της κίνησης. Σήμερα είναι γνωστό ότι ο Βόρειος Ουράνιος Πόλος κινείται σε έναν μικρό κύκλο, επιστρέφοντας στην ίδια θέση κάθε 26 000 χρόνια περίπου.

Οι αρχαίοι Έλληνες γνώριζαν επίσης καλά (αν και σήμερα, όπως φαίνεται, η γνώση αυτή περιορίζεται στους ειδήμονες) ότι, ενώ ο Ήλιος συμμετέχει στην ημερήσια κίνηση των άστρων, δεν τα ακολουθεί πλήρως. Παρατηρώντας τα άστρα ακριβώς πριν από την ανατολή και ακριβώς μετά τη δύση του Ήλιου, μπορεί κανείς να ανακαλύψει ότι ο Ήλιος αλλάζει αργά τη θέση του σε σχέση με τα άστρα κάθε μέρα. Στην πραγματικότητα, ακολουθεί τροχιά από τη Δύση προς την Ανατολή ανάμεσα στα άστρα, διασχίζοντας τα «σημεία του Ζωδιακού κύκλου» και επιστρέφοντας στο αρχικό του σημείο μετά από 365 ημέρες. Ακριβέστερα, ο Ήλιος δεν κινείται απλώς προς τα ανατολικά, αλλά και από τον Βορρά προς τον Νότο: στις 21 Μαρτίου περίπου (*εαρινή ισημερία*) ο Ήλιος είναι το μεσημέρι κατακόρυφος σε μέρη που βρίσκονται στον ισημερινό της Γης, κατόπιν κινείται προς τον Βορρά κάθε μέρα μέχρι την 21η Ιουνίου περίπου (*θερινό ηλιοστάσιο*), οπότε το



Σχ. 1.1

μεσημέρι είναι κατακόρυφος σε μέρη που βρίσκονται $23\frac{1}{2}^\circ$ βόρεια του ισημερινού (*Τροπικός του Καρκίνου*). Ο Ήλιος κινείται κατόπιν προς τον Νότο, έτσι ώστε στις 23 Σεπτεμβρίου περίπου (*φθινοπωρινή ισημερία*) βρίσκεται το μεσημέρι ξανά ακριβώς πάνω από τον ισημερινό, ενώ στις 21 Δεκεμβρίου περίπου (*χειμερινό ηλιοστάσιο*) το μεσημέρι είναι κατακόρυφος σε μέρη που βρίσκονται $23\frac{1}{2}^\circ$ νότια του ισημερινού (*Τροπικός του Αιγόκερω*). Ο Ήλιος κινείται κατόπιν προς τον Βορρά και ο κύκλος επαναλαμβάνεται (βλ. Σχ. 1.1).

Η προς Βορρά ή Νότο κίνηση του Ήλιου είναι βέβαια ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τις θερμοκρασίες στην επιφάνεια της Γης. Μεταξύ της 21ης Μαρτίου και της 23ης Σεπτεμβρίου, η ημέρα είναι μεγαλύτερη από 12 ώρες στο βόρειο ημισφαίριο και ο Ήλιος ανεβαίνει σχετικά ψηλά στον ουρανό (ανάλογα και με το γεωγραφικό πλάτος). Μεταξύ της 23ης Σεπτεμβρίου και της 21ης Μαρτίου, η ημέρα είναι μικρότερη από 12 ώρες στο βόρειο ημισφαίριο και ο Ήλιος δεν ανεβαίνει τόσο ψηλά. (Οι συνθήκες αυτές απλώς

αντιστρέφονται για το νότιο ημισφαίριο). Στις 21 Μαρτίου και στις 23 Σεπτεμβρίου, η ημέρα και η νύκτα είναι παντού 12 ώρες· μιλάμε επομένως για *ισημερία*.

Η συσχέτιση μεταξύ των εποχών και της κίνησης του Ήλιου ανάμεσα στα άστρα ήταν μια επιστημονική ανακάλυψη ζωτικής σημασίας για τους αρχαίους αγροτικούς πολιτισμούς. Καθορίζοντας ένα ημερολόγιο 365 ημερών, οι αρχαίοι αστρονόμοι μπορούσαν να προβλέψουν τον ερχομό της άνοιξης και έτσι να συμβουλεύσουν τους γεωργούς πότε να σπείρουν τις καλλιέργειές τους. Τελικά ανακαλύφθηκε ότι ένα τέτοιο ημερολόγιο γίνεται όλο και περισσότερο ανακριβές, αν δεν προστεθούν κατά καιρούς επιπλέον ημέρες για να αντισταθμίσουν το άβολο γεγονός ότι το έτος (όπως μετράται με τον χρόνο που χρειάζεται ο Ήλιος για να επιστρέψει σε ένα συγκεκριμένο σημείο ανάμεσα στα άστρα) είναι μεγαλύτερο από 365 ημέρες κατά ένα τέταρτο της ημέρας περίπου. Μια άλλη δυσκολία ήταν ότι η θέση του Ήλιου στον Ζωδιακό κύκλο στην εαρινή ισημερία άλλαζε βαθμιδόν με το πέρασμα των αιώνων. Για περισσότερα από χίλια χρόνια πριν από τη γέννηση του Χριστού, ο Ήλιος στις 21 Μαρτίου βρισκόταν ανάμεσα στα άστρα του αστερισμού του Κριού, αλλά σιγά-σιγά μετακινήθηκε στον αστερισμό των Ιχθύων, όπου και σήμερα βρίσκεται κάθε χρόνο εκείνη την ημέρα. Μετά από λίγους αιώνες θα βρίσκεται στον Υδροχόο*. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *μετάπτωση των ισημεριών* και, όπως θα φανεί παρακάτω, είναι απλώς μία ακόμη όψη της βαθμιαίας κίνησης του Βόρειου Ουράνιου Πόλου που αναφέρθηκε παραπάνω.

Τέλος, οι αρχαίοι παρατήρησαν ότι ορισμένα άστρα δεν παραμένουν σε σταθερές θέσεις στην ουράνια σφαίρα, αλλά περιπλανώνται σε αυτήν με έναν πολύπλοκο,

αλλά κανονικό, τρόπο. Τα άστρα αυτά ονομάστηκαν *πλανήτες* (λόγω ακριβώς της περιπλάνησής τους) και η μελέτη των κινήσεών τους ήταν μία από τις κύριες ασχολίες των αστρονόμων μέχρι τον 17ο μ.Χ. αιώνα.

Οι αρχαίες ελληνικές θεωρίες για την πλανητική κίνηση δεν αποτελούσαν στενά τεχνικές προσπάθειες να συσχετισθούν τα δεδομένα ενός συγκεκριμένου συνόλου παρατηρήσεων σύμφωνα με τον τρόπο που θα μπορούσε σήμερα να ονομασθεί «επιστημονικός». Οι Έλληνες φιλόσοφοι προτιμούσαν μια ευρύτερη προσέγγιση. Στη βάση προκαταρκτικών παρατηρήσεων, ένας αστρονόμος θα μπορούσε να διατυπώσει ένα μοντέλο πλανητικής κίνησης το οποίο θα εξηγούσε τα τότε διαθέσιμα δεδομένα. Για να διατηρήσει όμως ένα τέτοιο μοντέλο την αξία του, δεν ήταν τόσο πολύ αναγκαίο να βρίσκεται σε συμφωνία με όλες τις μεταγενέστερες παρατηρήσεις, όσο να συναρμόζεται με άλλες ιδέες, περισσότερο φιλοσοφικές ή θεολογικές. Οι Πυθαγόρειοι, για παράδειγμα, θεωρούσαν ότι τα σχετικά μεγέθη των τροχιών των πλανητών ήταν ανάλογα με τα μήκη των διαδοχικών χορδών ενός αρμονικά κουρδισμένου έγχορδου οργάνου. Αυτή η αναλογία επιβεβαίωνε την «αρμονία των σφαιρών», μια ιδέα που ήταν περισσότερο σημαντική και ικανοποιητική στα πλαίσια των γενικών φιλοσοφικών απαιτήσεων των Πυθαγορείων από ό,τι θα ήταν οι σχετικά πιο περιορισμένες απαιτήσεις ποσοτικής προβλεψιμότητας των φυσικών φαινομένων που χαρακτηρίζουν τη σύγχρονη Αστρονομία. Ή, για να αναφέρουμε ένα παράδειγμα από μια εντελώς διαφορετική σχολή της ελληνικής επιστήμης, ο Αριστοτέλης ανακάλυψε στις ποιοτικές παρατηρήσεις της ελεύθερης πτώσης μεγάλων και μικρών σωμάτων αρκετά δεδομένα, τα οποία του επέτρεψαν να ενσωματώσει ικανοποιητικά αυτά τα φυσικά φαινόμενα στο φιλοσοφικά ευρύτερο, και άρα για αυτόν περισσότερο ικανοποιητικό, πλαίσιο της θεωρίας των στοιχείων και του φυσικού τόπου.

* Εξ ου και η αστρολογική διαπίστωση ότι εισερχόμαστε στην «εποχή του Υδροχόου».

1.2 ΤΟ ΠΛΑΤΩΝΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Δεν υπάρχει τίποτα πιο εύκολο και περισσότερο εσφαλμένο από την υποτίμηση της οπτικής γωνίας των αρχαίων Ελλήνων. Η Μηχανική των αρχαίων Ελλήνων όχι μόνο «δούλευε» μέσα στα όρια της εποχής, αλλά, σε ορισμένες σχολές σκέψης, αποτελούσε επίσης μια μεγαλοπρεπή και βαθύτατα σημαντική πνευματική κατασκευή. Πάνω από όλα, η ελληνική επιστήμη αποτελεί, κατά κάποιον τρόπο, την παιδική ηλικία της επιστήμης, η οποία δεν πρέπει να κρίνεται με τους όρους της ωριμότερης οπτικής γωνίας της σύγχρονης γνώσης. Μπορεί να είναι αλήθεια ότι τελικά έπαψε να είναι χρήσιμη, αλλά προσέφερε στη νεότερη ανθρωπότητα την κατεύθυνση προς την οποία μπορούσε να εξελιχθεί γόνιμα. Η επίδραση της ελληνικής σκέψης είναι παρούσα σε κάθε σύγχρονη δραστηριότητα, στην επιστήμη όχι λιγότερο από ό,τι στην τέχνη ή στη νομική, στην πολιτική ή στην εκπαίδευση.

Η αστρονομία αποτελεί σημαντικό παράδειγμα. Λέγεται ότι ο Πλάτων (427-347 π.Χ.) έθεσε το ακόλουθο πρόβλημα στους μαθητές του: Τα άστρα – αιώνια, θεία, αμετάβλητα όντα – κινούνται γύρω από τη Γη, όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε, ακολουθώντας την κατ'εξοχήν τέλεια τροχιά, τον κύκλο. Αλλά ένας μικρός αριθμός «άστρων» φαίνονται να περιπλανώνται ανησυχητικά στον ουρανό, διαγράφοντας ακανόνιστα σχήματα κατά τη διάρκεια της ετήσιας πορείας τους, πράγμα που δημιουργεί αμηχανία. Αυτοί είναι οι πλανήτες. Σίγουρα και αυτοί πρέπει στην πραγματικότητα να κινούνται σε ομοιόμορφους και κανονικούς κύκλους, ή μάλλον, στην περίπτωση τους, σε συνδυασμούς κύκλων. Πώς θα μπορούσαμε λοιπόν να εξηγήσουμε τα παρατηρησιακά δεδομένα των πλανητικών κινήσεων και με αυτόν τον τρόπο να «σώσουμε τα φαινόμενα»; Η σημαντική αυτή ερώτηση του Πλάτωνα μπορεί να παραφρασθεί με τον ακό-

λουθο τρόπο: «Καθορίστε τις *ομαλές και κανονικές* κινήσεις που πρέπει να υποθέσουμε για κάθε πλανήτη, ώστε να εξηγηθούν οι φαινόμενες ακανόνιστες κινήσεις τους». Η ίδια η διατύπωση αυτού του ιστορικού προβλήματος συμπυκνώνει με εντυπωσιακό τρόπο τις δύο κύριες συνεισφορές της αρχαίας ελληνικής φιλοσοφίας στο θέμα που συζητάμε:

α) Η φυσική θεωρία (π.χ. η θεωρία των πλανητικών κινήσεων) είναι κατανοητή μόνο στο πλαίσιο εκ των προτέρων μεταφυσικών υποθέσεων (π.χ. της προϋπόθεσης ότι τα ουράνια σώματα πρέπει να εκτελούν «τέλειες» κυκλικές κινήσεις).^{*} Η θέση αυτή αποδείχθηκε άγονο δόγμα για να βασιστεί η επιστημονική δραστηριότητα. Κατά τη διάρκεια του 16ου και του 17ου αιώνα, μετά τη μεγάλη διαμάχη που θα εξετάσουμε σε επόμενα κεφάλαια, άρχισε να εγκαταλείπεται χάριν της πειραματικής επιστήμης.

β) Η φυσική θεωρία χτίζεται πάνω σε παρατηρήσιμα και μετρήσιμα φαινόμενα (π.χ. τη φαινομένη κίνηση των πλανητών), αφορά τις κανονικότητες συμπεριφοράς που βρίσκονται πίσω από τη φαινόμενη πολυπλοκότητα, και εκφράζεται στη γλώσσα των αριθμών και της γεωμετρίας. Αυτή η καθοδηγητική ιδέα, την οποία ο Πλάτων δεν επεξέτεινε πέραν της Αστρονομίας και η οποία προερχόταν εν μέρει από τους Πυθαγόρειους, ήταν μια πολύτιμη ένδειξη, η οποία επανεμφανίστηκε όταν ο Κέπλερ και ο Γαλιλαίος δημιούργησαν την πειραματική τους επιστήμη. Αλλά ο Πλάτων υποστήριζε ότι οι φυσικοί νόμοι μπορούν να συναχθούν από άμεσα διαισθητές αρχές, με στόχο την εξήγηση συγκεκριμένων φαινομέ-

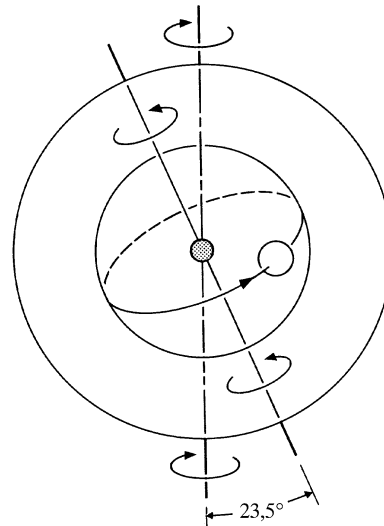
^{*} Ο όρος *Μεταφυσική* χρησιμοποιείται με συγκεκριμένη σημασία: είναι ο κλάδος που μελετά αρχές της γνώσης ή του όντος με τη χρήση διαισθητικών, προφανών εννοιών, εννοιών της άμεσης «καθημερινής» εμπειρίας, και αναλογιών.

νων στα πλαίσια ενός φιλοσοφικού συστήματος. Η αλήθεια μιας αρχής δεν μετριόταν, όπως σήμερα, από τη χρησιμότητά της σε κάθε δυνατή, γνωστή ή προβλεπόμενη φυσική κατάσταση. Αυτό φαίνεται στην ακόλουθη πρόταση από τον *Φαίδωνα* του Πλάτωνα: «Αυτή ήταν η μέθοδος που υιοθέτησα: Πρώτα υπέθετα κάποιαν αρχή, την οποία θεωρούσα την ισχυρότερη, και κατόπιν δεχόμουν ως αληθινό κάθε τι που φαινόταν να συμφωνεί μαζί της, είτε σχετικά με την αιτία είτε με οτιδήποτε άλλο· και αυτό που δεν συμφωνούσε το θεωρούσα ψευδές».

Η συγκεκριμένη αστρονομική ερώτηση του Πλάτωνα, την οποία ο ίδιος δεν προσπάθησε σοβαρά να απαντήσει, απετέλεσε την κυριότερη ασχολία των αστρονόμων μέχρι την εποχή του Γαλιλαίου. Ας δούμε, λοιπόν, πώς προσπάθησαν να κατασκευάσουν ένα κοσμικό σύστημα σύμφωνα με το αξίωμα της «ομαλής και κανονικής κίνησης», δηλαδή ένα σύστημα που επιτρέπει στα ουράνια σώματα να κινούνται μόνο με ομαλές (σταθερές) κυκλικές κινήσεις ή σε συνδυασμούς διαφόρων τέτοιων κινήσεων. Θα ανακαλύψουμε ότι τελικά όλα αυτά τα συστήματα αποδείχθηκαν ανεπαρκή· αλλά η νεότερη επιστήμη γεννήθηκε από αυτήν την αποτυχία.

1.3 ΤΟ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Προφανώς, η πρώτη περίπτωση προς διερεύνηση, στην προσπάθεια εξορθολογισμού της κίνησης των ουράνιων σωμάτων, είναι το απλούστερο γεωκεντρικό σύστημα, στο οποίο η Γη βρίσκεται στο κέντρο της ουράνιας σφαίρας, όπου είναι τοποθετημένοι οι απλανείς αστέρες. Η παρατηρούμενη ημερήσια κίνηση αυτών των απλανών αστερών θα προκύψει απευθείας από το απλό μοντέλο μας, αν απαιτήσουμε η μεγάλη ουράνια σφαίρα να περιστρέφεται κάθε μέρα ομαλά γύρω από έναν άξονα που συμπίπτει με την ευθεία Βορράς-Νότος.



Σχ. 1.2 Η ετήσια (εποχική) κίνηση του Ήλιου από Βορρά προς Νότο, και αντιστρόφως, εξηγήθηκε με την υπόθεση ότι ο Ήλιος είναι στερεωμένος σε μια σφαίρα της οποίας ο άξονας παρουσιάζει κλίση $23\frac{1}{2}^\circ$ σε σχέση με τον άξονα της σφαίρας των απλανών.

Μπορούμε κατόπιν να προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε τη φαινόμενη κίνηση του Ήλιου, της Σελήνης και των πέντε ορατών πλανητών γύρω από τη σταθερή Γη θεωρώντας ότι το κάθε ουράνιο σώμα μεταφέρεται πάνω σε μια δική του διαφανή σφαίρα, η κάθε μία από τις οποίες είναι εγκιβωτισμένη στην άλλη, και όλες μαζί (συνολικά επτά) περικλείονται από τη σφαίρα των απλανών αστερών. Η Γη βρίσκεται στο κέντρο του όλου συστήματος (Σχ. 1.2). Αλλά αφού αυτά τα επτά ουράνια σώματα δεν ανατέλλουν και δύουν πάντοτε στο ίδιο σημείο του ορίζοντα, και δεδομένου ότι οι πλανήτες διατρέχουν ιδιαίτερα πολύπλοκες διαδρομές σε σχέση με τους απλανείς αστέρες, αναστρέφοντας μερικές φορές ακόμη και την κατεύθυνση της κίνησής τους, θα πρέπει να αποδώσουμε σε κάθε μία από τις σφαίρες τους ένα ολόκληρο σύνολο ταυτόχρονων περιστροφών γύρω από διαφορετικούς άξονες, όπου κάθε περιστροφή θα έχει την κατάλ-

ληλη ταχύτητα και διεύθυνση και κάθε άξονας θα έχει την κατάλληλη κλίση, ώστε να αναπαραχθούν οι παρατηρούμενες τροχιές.

Εδώ πραγματικά δοκιμάστηκε η μαθηματική μεγαλοφυΐα των αρχαίων Ελλήνων! Ο Ήλιος και η Σελήνη μπορούσαν να αντιμετωπισθούν με σχετική ευκολία, ορισμένοι όμως από τους πλανήτες αποδείχθηκαν ιδιαίτερα δύσκολοι. Ο μαθητής του Πλάτωνα, Εύδοξος, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι 26 ταυτόχρονοι ομαλές κινήσεις μπορούσαν να εξηγήσουν την κίνηση των επτά ουράνιων σωμάτων. Άλλοι πρότειναν την εγκατάλειψη της υπόθεσης ότι ο Ήλιος και οι πλανήτες είναι τοποθετημένοι σε ουράνιες σφαίρες – που σημαίνει ότι πρέπει να έχουν σταθερή απόσταση από τη Γη – και επεξεργάστηκαν τους περισσότερους πολύπλοκους συνδυασμούς κύκλων που θα παρουσιάσουμε περιληπτικά στα Υποκεφάλαια 1.6 και 1.7.

Όμως, είναι το καθήκον του αστρονόμου (ή κάθε επιστήμονα) αυστηρά περιορισμένο στην κατασκευή μαθηματικών συστημάτων, οσοδήποτε τεχνητών, που συμφωνούν με τις παρατηρήσεις; Έχει ολοκληρώσει το έργο του όταν μπορεί να «σώσει τα φαινόμενα» (ή να «ταιριάζει τα δεδομένα» όπως θα λέγαμε σήμερα) – ή θα πρέπει να αναζητήσει επίσης μια φυσικά εύλογη εξήγηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί η φύση;

Μια ξεκάθαρη απάντηση σε αυτήν την ερώτηση δόθηκε από τον Αριστοτέλη (384-322 π.Χ.), διάδοχο του Πλάτωνα και μεγαλύτερο φιλόσοφο της αρχαιότητας (ορισμένοι θα έλεγαν όλων των εποχών). Τα κοσμολογικά γραπτά του Αριστοτέλη αποτελούν οργανικό μέρος της συνολικής φιλοσοφίας του, καθώς αυτός συνένωσε σε ένα εννοιολογικό πλαίσιο στοιχεία τα οποία σήμερα διαχωρίζουμε σε διαφορετικές συνιστώσες – επιστημονικές, ποιητικές, θεολογικές, ηθικές. Η έμφαση της αριστοτελικής θεωρίας του κόσμου στη φυσική κατανόηση και όχι στον μαθηματικό υπολογισμό ήταν

αυτή που οδήγησε στην ευρεία αποδοχή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της μεσαιωνικής περιόδου που προηγήθηκε της γέννησης της νεότερης επιστήμης.

Από τι αποτελείται το σύμπαν; Ξεκινώντας από τρέχουσες απόψεις της εποχής του, ο Αριστοτέλης διατύπωσε την αρχή ότι όλη η ύλη με την οποία μπορούμε να έλθουμε σε φυσική επαφή αποτελείται από ένα μείγμα τεσσάρων στοιχείων: Γη, Νερό, Αέρα και Φωτιά. Στην πραγματικότητα τα αμιγή στοιχεία δεν απαντώνται στη φύση: μια ποσότητα χρώματος ή μια πέτρα αποτελούνται κυρίως από το στοιχείο Γη, περιέχουν όμως μικρότερες προσμίξεις των άλλων τριών στοιχείων. Ομοίως, ένα δοχείο με το καθαρότερο νερό που θα μπορούσε να απομονωθεί υποτίθεται ότι περιείχε εκτός από το στοιχείο Νερό και κάποια γήινη πρόσμειξη. Πράγματι, αν βράσει κανείς μέχρι τελικής εξάτμισης το υγρό, απομένει ένα στερεό υπόλειμμα. (Αυτό το πείραμα και η ερμηνεία του ήταν τόσο πειστικά, ώστε όταν ο μεγάλος χημικός Λαβουαζιέ, με μια ιδιοφυή πειραματική επίδειξη, απέδειξε για πρώτη φορά στα 1770 ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτού του υπολείμματος προέρχεται από τα τοιχώματα του δοχείου, σημείωσε επίσης ότι «κάποιοι σύγχρονοι χημικοί συμμερίζονται ακόμα την πεποίθηση των παλαιών φιλοσόφων»).

Μια δεύτερη αριστοτελική αρχή καθόριζε ότι το κάθε ένα από τα τέσσερα στοιχεία έχει την τάση ή την επιθυμία να φθάσει στον «φυσικό τόπο» ηρεμίας του: η Γη στον πυθμένα (ή στο κέντρο του σύμπαντος), κατόπιν το Νερό, έπειτα ο Αέρας, και τέλος η Φωτιά στην κορυφή.

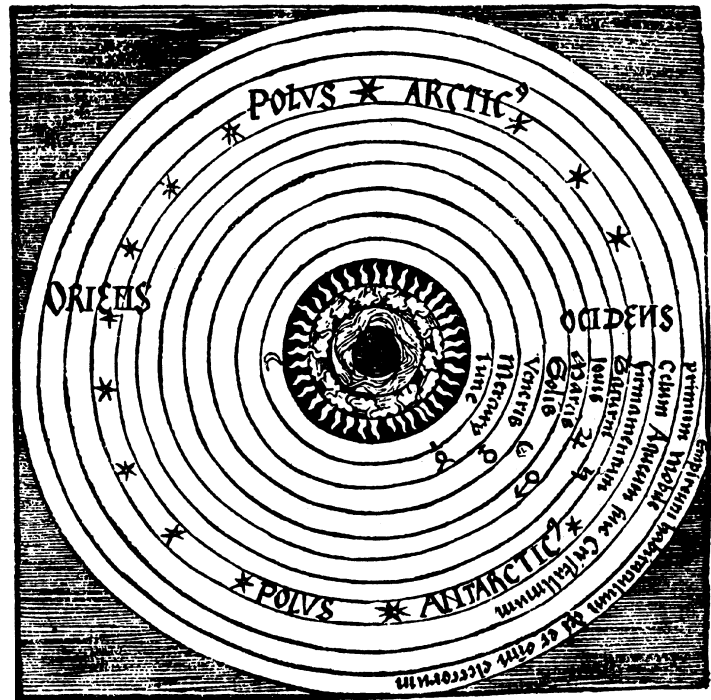
Σύμφωνα με μια τρίτη αρχή, η πραγματική κίνηση κάθε αντικειμένου καθορίζεται από την τάση του κυρίαρχου στο μείγμα στοιχείου. Έτσι η συμπεριφορά του ατμού που αναδύεται από ένα δοχείο που βράζει μπορούσε να εξηγηθεί ως η ανοδική κίνηση που οφείλεται στην εισαγωγή του στοιχείου Φωτιά στο θερμαινόμενο νερό. Κατόπιν, αν με τη βοήθεια ψύξης ο ατμός χάσει τη

Φωτιά του, το στοιχείο που θα κυριαρχήσει, το Νερό, επιβάλλει ξανά την κυριαρχία του και η συμπυκνωμένη υγρασία θα κινηθεί καθοδικά προς τον φυσικό της τόπο που βρίσκεται προς τα κάτω.

Μια συνέπεια αυτής της άποψης ήταν ότι η καθοδική ή ανοδική κίνηση ενός αντικειμένου προς τον φυσικό του τόπο, η επονομαζόμενη «φυσική κίνηση», καθορίζεται από το ισοζύγιο των στοιχείων που το συνιστούν, ενώ η ταχύτητά του είναι ανάλογη της ποσότητας του στοιχείου που επικρατεί. Μια μεγάλη πέτρα, για παράδειγμα, η οποία περιέχει προφανώς περισσότερη Γη από μια μικρότερη, θα κινηθεί κατά συνέπεια με ανάλογα μεγαλύτερη ταχύτητα, αν αφαιρεθεί να εκτελέσει τη φυσική κίνηση της ελεύθερης πτώσης. Θα επιστρέψουμε σε αυτό το σημείο στο Κεφάλαιο 7, όπου θα δούμε ότι αυτή η πρόβλεψη σχετικά με την ταχύτητα σωμάτων που πέφτουν απετέλεσε έναν από τους μοχλούς με τη βοήθεια των οποίων ο Γαλιλαίος ανέτρεψε το αριστοτελικό σύστημα.

Ο Αριστοτέλης διετύπωσε επίσης τη θέση ότι αυτά τα τέσσερα στοιχεία απαντώνται μόνο στην επίγεια ή «υποσελήνια» περιοχή. Πέραν αυτής της περιοχής υπάρχει ένα στοιχείο εντελώς διαφορετικού είδους, ο *Αιθέρας**, από το οποίο αποτελούνται οι ουρανοί. Ενώ τα τέσσερα επίγεια στοιχεία ενέχονται διαρκώς σε διεργασίες μεταβολής – «γενέσεως και φθοράς» σύμφωνα με την επιτυχημένη φράση του Αριστοτέλη – ο Αιθέρας είναι εξ ορισμού αμιγής και αμετάβλητος. Ο Αιθέρας χαρακτηρίζεται από τη δική του φυσική κίνηση, η οποία προσιδιάζει στη φύση του, μια κίνηση που δεν έχει ούτε αρχή ούτε τέλος και παραμένει πάντα στον φυσικό τόπο της: η *κυκλική κίνηση*. Κατά συνέπεια, η χρήση των κύκλων στην εξήγηση των κινήσεων των ουράνιων σωμάτων, σύμφωνα με την προτροπή του

* Αιθήρ (από το αίθω = καίω) ο οποίος, ως πέμπτη ουσία, ονομάστηκε αργότερα *πεμπτουσία*.



Σχ. 1.3 Μια ύστερη μεσαιωνική απεικόνιση του κόσμου. Η σφαίρα της Σελήνης (lune) διαχωρίζει την επίγεια περιοχή (η οποία αποτελείται από τους τέσσερις ομόκεντρους κύκλους της Γης, του Νερού, του Αέρα και της Φωτιάς) από την ουράνια περιοχή. Πέραν της Σελήνης συναντάμε τις ομόκεντρες σφαίρες που μεταφέρουν τον Ερμή, την Αφροδίτη, τον Ήλιο, τον Άρη, τον Δία, τον Κρόνο και τους απλανείς αστέρες. (Ξυλογραφία του 1508).

Πλάτωνα, δεν αποτελεί απλώς μαθηματική διευκόλυνση ή σύμβαση: στο αριστοτελικό σύστημα προκύπτει ως φιλοσοφική αναγκαιότητα.

Ο Αριστοτέλης συνέλαβε το σύστημα των ουράνιων σφαιρών με έναν μηχανικό τρόπο, ο οποίος δεν είναι εντελώς ξένος προς τη Φυσική του 17ου, 18ου και 19ου αιώνα. Έξω από τη μεγαλύτερη σφαίρα (στην οποία είναι στερεωμένοι οι απλανείς αστέρες) βρίσκεται το θείο «Πρώτον Κινούν» (στο Σχ. 1.3 ονομάζεται *primum*

mobile). Το πρώτον κινούν περιστρέφει τη σφαίρα των απλανών με σταθερή ταχύτητα. Η κίνηση αυτή μεταδίδεται, με κάποιες απώλειες λόγω τριβής, στις σφαίρες των εξωτερικών πλανητών και από εκεί στις σφαίρες του Ήλιου και των εσωτερικών πλανητών. Ο Αριστοτέλης αποδέχθηκε μεν τις προαναφερθείσες 26 σφαίρες του Ευδόξου, αλλά πρότεινε την εισαγωγή 29 επιπλέον σφαιρών, εν μέρει για να αντιμετωπίσει τις πλέον φανερές διαφορές μεταξύ του συστήματος του Ευδόξου και των παρατηρούμενων τροχιών των πλανητών, και εν μέρει ως ενδιάμεσες σφαίρες που είναι αναγκαίες για να «αντισταθμίσουν» την αντίστροφη κίνηση ορισμένων σφαιρών.

Παρ' όλα αυτά, διάφορα ευκόλως παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά του ουρανού παρέμειναν ανεξήγητα από το αριστοτελικό σύστημα – ιδιαίτερα το γεγονός ότι κάποια σώματα (ο Ήλιος, η Σελήνη, η Αφροδίτη, ο Άρης και ο Δίας) ορισμένες φορές φαίνονται λαμπρότερα ή κοντύτερα στη Γη και άλλες φορές φαίνονται περισσότερο απομακρυσμένα. Ένα σύνολο ομαλών περιστροφών των άστρων πάνω σε *ομόκεντρες* με τη Γη σφαίρες δεν θα τους επέτρεπε να αλλάξουν την απόστασή τους από εκείνην. Ο Αριστοτέλης γνώριζε τα παραπάνω, αλλά αγνόησε τη σημασία αυτού του απλού, αλλά τελικά μοιραίου, επιχειρήματος κατά της θεμελιώδους υπόθεσης του συστήματός του. Δεν εκτίμησε σωστά τη σοβαρότητα των συνεπειών αυτού του γεγονότος (η οποία για μας είναι παραπλανητικά προφανής) κυρίως γιατί εκείνη την εποχή, όπως άλλωστε και σήμερα, ήταν ασύγκριτα ευκολότερο να αφήσει κανείς σε αμφιβολία τη μαρτυρία ενός μικρού αριθμού αντίθετων παρατηρήσεων, από το να εγκαταλείψει μια ολόκληρη κοσμοθεωρία, η οποία εμφανιζόταν παγιωμένη και αναγκαία από την οπτική γωνία της Φιλοσοφίας και της Μηχανικής του. Φυσικά αυτό δεν σημαίνει ότι ο Αριστοτέλης υποστήριξε μια θεωρία που ήξερε ότι

ήταν εσφαλμένη. Η αρχική αριστοτελική επιστήμη δεν ήταν απλώς σύγχρονη επιστήμη κακής ποιότητας, αλλά μια δραστηριότητα θεμελιωδώς διαφορετική από τη σύγχρονη επιστήμη. Μπορούμε ίσως να διακρίνουμε εδώ το παράδειγμα ενός σημαντικού ανθρώπινου χαρακτηριστικού, το οποίο ανιχνεύεται σε κάθε επιστημονικό έργο και το οποίο ακόμα και οι μεγαλύτεροι στοχαστές δεν μπορούν να υπερβούν εντελώς. Έχουμε όλοι την τάση να αρνούμαστε τη σημασία γεγονότων ή παρατηρήσεων που δεν συμφωνούν με τις πεποιθήσεις και τις προκαταλήψεις μας, έτσι ώστε ορισμένες φορές να τα αγνοούμε εντελώς, ακόμα και αν, από μια άλλη οπτική γωνία, βρίσκονται μπροστά στα μάτια μας. Επιπλέον, ακόμα και η πιο γενική και σύγχρονη επιστημονική θεωρία δεν μπορεί να ελπίζει ότι μπορεί να αντιμετωπίσει κάθε λεπτομέρεια κάθε συγκεκριμένης περίπτωσης (ή να προσπαθεί σοβαρά για κάτι τέτοιο). Σε κάθε περίπτωση, αναγκάζομαστε να εξιδανικεύουμε τις παρατηρήσεις μας, πριν από οποιαδήποτε προσπάθεια αντιστοίχισης των «γεγονότων» με τη θεωρία – όχι μόνο επειδή υπάρχουν συνήθως αναπόφευκτες πειραματικές αβεβαιότητες στην παρατήρηση, αλλά επειδή τα εννοιολογικά σχήματα είναι συνειδητά σχεδιασμένα να ισχύουν για *επιλεγμένες* παρατηρήσεις και όχι στην ολότητα της «ωμής» εμπειρίας. Κατά συνέπεια, η ιστορία της επιστήμης είναι γεμάτη με περιπτώσεις στις οποίες αποδείχθηκε αργότερα ότι μια αγνοηθείσα πλευρά ενός φαινομένου ήταν στην πραγματικότητα η πιο σημαντική όψη του. Από την άλλη πλευρά, όμως, αν δεν είχαν υπάρξει προσωρινές, ημιτελείς ή και απλώς εσφαλμένες θεωρίες στην επιστήμη, πιθανότατα δεν θα βλέπαμε ποτέ την ανάπτυξη μιας ορθής θεωρίας. Αφού ένα τέτοιο έργο δεν είναι ανθρωπίνως δυνατό να ολοκληρωθεί με την πρώτη προσπάθεια, πρέπει να είμαστε ικανοποιημένοι με διαδοχικές προσεγγίσεις.

1.4 ΠΟΣΟ ΜΕΓΑΛΗ ΕΙΝΑΙ Η ΓΗ;

Ο Μέγας Αλέξανδρος (356-323 π.Χ.), του οποίου την εκπαίδευση σε νεαρή ηλικία είχε αναλάβει ο Αριστοτέλης, κατέκτησε το μεγαλύτερο μέρος του γνωστού στους αρχαίους Έλληνες κόσμου κατά τη διάρκεια της σύντομης ζωής του. Το 331 π.Χ. πρόσθεσε την Αίγυπτο στην αυτοκρατορία του και ίδρυσε εκεί την πόλη της Αλεξάνδρειας. Κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, το κέντρο του ελληνικού πολιτισμού μετακινήθηκε από την Αθήνα στην Αλεξάνδρεια. Αν και η αυτοκρατορία του Αλεξάνδρου διαλύθηκε μετά τον θάνατό του, το βασίλειο των Πτολεμαίων στην Αίγυπτο διατήρησε τον ελληνικό πολιτισμό σε υψηλά επίπεδα για τους επόμενους δύο αιώνες. Η ίδια η Αλεξάνδρεια μεταβλήθηκε σε ένα κοσμοπολίτικο μείγμα φυλών και δοξασιών· ο πληθυσμός ήταν κυρίως Αιγυπτιακός, με μια Ελληνο-Μακεδονική άρχουσα τάξη και πολλούς Εβραίους, Αφρικανούς, Σύρους, Αραβες, Ινδούς κ.λπ. Ο Τζωρτζ Σάρτον (George Sarton), που έχει γράψει εκτενώς για την ελληνική επιστήμη στην Αλεξάνδρεια, παρομοιάζει τη σχέση μεταξύ Αλεξάνδρειας και Αθήνας με αυτήν ανάμεσα στη Νέα Υόρκη και το Λονδίνο.

Δύο από τα πιο φημισμένα πνευματικά ιδρύματα του αρχαίου κόσμου ήταν το Μουσείο και η Βιβλιοθήκη της Αλεξάνδρειας. Το Μουσείο ήταν το κέντρο επιστημονικής και μαθηματικής έρευνας, που διεξήγαν επιστήμονες όπως ο Ευκλείδης, ο Απολλώνιος, ο Ερατοσθένης, ο Ίππαρχος, ίσως ο Αρίσταρχος και (πολύ αργότερα) ο αστρονόμος Πτολεμαίος (που δεν είχε σχέση με τη βασιλική δυναστεία των Πτολεμαίων). Ορισμένα από αυτά τα ονόματα θα τα συναντήσουμε ξανά παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο.

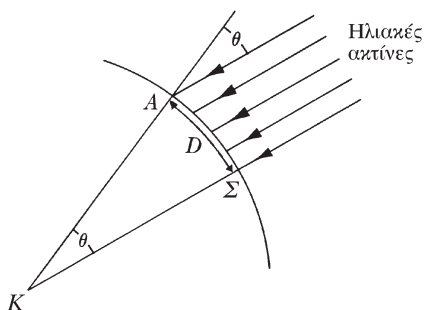
Ο Ερατοσθένης (273-192 π.Χ.) σπούδασε στην Αθήνα, αλλά πέρασε περισσότερο από το μισό της ζωής του στην Αλεξάνδρεια. Σε μια εποχή που πολλοί επιστήμο-

νες εξειδικεύονταν ήδη υπερβολικά στα Μαθηματικά ή στην Αστρονομία, ο Ερατοσθένης, όπως ο Αριστοτέλης, απετόλμησε μια σφαιρικότερη προσέγγιση των πραγμάτων. Ως διευθυντής της Βιβλιοθήκης της Αλεξάνδρειας, ήταν υπεύθυνος όχι μόνο για τη συλλογή, την ταξινόμηση και τη συντήρηση αρκετών χιλιάδων παπύρων, αλλά και για τη γνώση του περιεχομένου τους. Χρησιμοποιώντας τα Μαθηματικά και τη γνώση του για τον κόσμο, ίδρυσε την επιστήμη της Γεωγραφίας. Οι σύγχρονοί του τον αποκαλούσαν με διάφορα σκωπτικά ονόματα, όπως «βήτα» (με την έννοια «δευτέρας διαλογής») ή «πένταθλος» (ασχολούμενος με πολλά πράγματα). Υπέθεταν ότι όποιος ασχολείται με όλα τα θέματα δεν μπορεί να κατέχει κανένα. Παρ' όλα αυτά, ο Ερατοσθένης κατάφερε ένα ξεχωριστό επίτευγμα: μέτρησε το μέγεθος της Γης!

Μια σύντομη περιγραφή των υπολογισμών του Ερατοσθένη θα μας δώσει μια ενδεικτική εικόνα του υψηλού επιπέδου στο οποίο είχε φθάσει η ελληνική επιστήμη τον 3ο αιώνα π.Χ. Ο Ερατοσθένης έκανε τις εξής παραδοχές:

- 1) Η Γη είναι σφαιρική.
- 2) Οι ηλιακές ακτίνες είναι παράλληλες όταν φθάνουν στην επιφάνεια της Γης (που σημαίνει ότι ο Ήλιος πρέπει να βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από τη Γη).
- 3) Τα δύο σημεία της επιφάνειας της Γης στα οποία έκανε τις παρατηρήσεις του, η Αλεξάνδρεια και η Σϋήνη (το σημερινό Ασσουνάν), βρίσκονται πάνω στον ίδιο μεσημβρινό.
- 4) Η Σϋήνη βρίσκεται ακριβώς πάνω στον Τροπικό του Καρκίνου (γεωγραφικό πλάτος $23\frac{1}{2}^\circ$ Β) και έτσι ο Ήλιος είναι εκεί κατακόρυφος το μεσημέρι του θερινού ηλιοστασίου.

Καμιά από αυτές τις παραδοχές δεν είναι απολύτως ορθή, αλλά είναι τόσο κοντά στην πραγματικότητα, ώστε ο Ερατοσθένης μπόρεσε να εξαγάγει ένα εξαιρετικά ακριβές αποτέλεσμα.



Σχ. 1.4 Ο υπολογισμός του μεγέθους της Γης από τον Ερατοσθένη.

Οι υπολογισμοί βασίζονταν σε δύο μετρήσεις: τη γωνία μεταξύ των ακτίνων του Ήλιου και μιας κατακόρυφης ράβδου το μεσημέρι του θερινού ηλιοστασίου στην Αλεξάνδρεια (μια εύκολη μέτρηση) και τη γραμμική απόσταση (D) μεταξύ της Αλεξάνδρειας (A) και της Συήνης (Σ) (μια δύσκολη μέτρηση, που στηρίχθηκε στη χρονομέτρηση της πορείας μεταξύ του A και του Σ μιας εκπαιδευμένης ομάδας στρατιωτών, οι οποίοι κινούνταν με γνωστή και σχετικά σταθερή ταχύτητα). Σύμφωνα με την τέταρτη υπόθεση, η γωνία στο A πρέπει να είναι ίση με την γωνία θ που υποτείνεται στο κέντρο της Γης, K , από το τόξο $A\Sigma$. Με άλλα λόγια, είναι η διαφορά γεωγραφικού πλάτους μεταξύ της Αλεξάνδρειας και της Συήνης. Ο Ερατοσθένης χρησιμοποίησε κατόπιν την αναλογία μεταξύ της γωνίας θ και της απόστασης D : ο λόγος της θ προς τον πλήρη κύκλο (360°) είναι ίσος με τον λόγο του D προς το μήκος της περιφέρειας του κύκλου, c .

$$\frac{D}{c} = \frac{\theta}{360},$$

όπου θ είναι η γωνία $AK\Sigma$, c είναι το μήκος της περιφέρειας της Γης και D το μήκος του τόξου $A\Sigma$.

Σύμφωνα με τον Ερατοσθένη, η γωνία θ βρέθηκε ακριβώς ίση με το ένα πεντηκοστό του πλήρους κύκλου:

$$\theta = \frac{360}{50} = 7,2^\circ$$

και η απόσταση που μετρήθηκε ήταν

$$D = 5000 \text{ στάδια.}$$

Επομένως, επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς c , ο Ερατοσθένης βρήκε ότι το μήκος της περιφέρειας της Γης είναι

$$c = \frac{360D}{\theta} = 250\,000 \text{ στάδια.}$$

Για να συγκρίνουμε αυτό το αποτέλεσμα με τη σύγχρονη τιμή, χρειαζόμαστε απλώς τον παράγοντα μετατροπής μεταξύ της αρχαίας ελληνικής μονάδας απόστασης, του σταδίου, και κάποιας σύγχρονης μονάδας (όπως το χιλιόμετρο). Δυστυχώς υπάρχουν κάποιες αμφιβολίες σχετικά με αυτόν τον παράγοντα μετατροπής· η καλύτερη εκτίμησή μας είναι ότι το στάδιο ήταν περίπου 160 μέτρα, ή ίσως λίγο μεγαλύτερο. Ανάλογα με τον παράγοντα που θα χρησιμοποιήσουμε, το αποτέλεσμα του Ερατοσθένη δεν διαφέρει περισσότερο από 1 ή 2 % από τη σύγχρονη τιμή των 39 942 χιλιομέτρων για την πολική περιφέρεια της Γης ή των 6357 χιλιομέτρων για την πολική ακτίνα της. Σε κάθε περίπτωση, επρόκειτο για μια εντυπωσιακή κατάδειξη του ότι ο ανθρώπινος νους μπορούσε να επισκοπεί περιοχές του κόσμου τουλάχιστον κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές που μπορούσαν να κατακτηθούν μέσω φυσικής δύναμης, ακόμα και από τον Μέγα Αλέξανδρο.

Πρόβλημα 1.1 Τα δεδομένα που αναφέρονται από τον Ερατοσθένη φαίνονται να έχουν στρογγυλοποιηθεί. Αν υποθέσουμε ότι η τιμή της γωνίας θ είναι στην πραγματικότητα μεταξύ $\frac{360}{49}$ και $\frac{360}{51}$ μοίρες και ότι η απόσταση D είναι στην πραγματικότητα μεταξύ 4900 και 5100 στάδια, υπολογίστε το ανώτερο και το κατώτερο όριο της μέτρησης της περιφέρειας και της ακτίνας της Γης σε στάδια. Μετατρέψτε αυτές τις τιμές σε χιλιόμετρα, υποθέτοντας ότι 1 στάδιο = 160 μέτρα.

1.5 Η ΗΛΙΟΚΕΝΤΡΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Τα προβλήματα των πλανητικών κινήσεων συνέχισαν, φυσικά, να υφίστανται. Μετά τον Αριστοτέλη, προέκυψαν δύο διαφορετικοί σημαντικοί τρόποι προσέγγισης του προβλήματος – η ηλιοκεντρική θεωρία και η τροποποιημένη γεωκεντρική θεωρία. Ας αρχίσουμε λοιπόν με την πρώτη προσέγγιση. Ο Αρίσταρχος ο Σάμιος (3ος αιώνας π.Χ.), επηρεασμένος ίσως από το έργο του Ηρακλείδη του Ποντικού (4ος αιώνας π.Χ.), υποστήριξε ότι, αν τοποθετούσαμε τον Ήλιο στο κέντρο του σύμπαντος, και η Σελήνη, η Γη και οι πέντε τότε γνωστοί πλανήτες περιφέρονταν γύρω από τον Ήλιο σε τροχιές με διαφορετικά μεγέθη και ταχύτητες, θα προέκυπτε ένα απλό αστρονομικό μοντέλο του κόσμου. Δεν γνωρίζουμε πολλές λεπτομέρειες· το έργο του Αρίσταρχου σχετικά με το θέμα μάς είναι γνωστό μόνο μέσω αναφορών σε άλλα αρχαία γραπτά. Προφανώς όμως, υπέθεσε ότι η Γη εκτελεί μια καθημερινή περιστροφή γύρω από έναν άξονα με διεύθυνση Βορρά – Νότου και μία ετήσια περιφορά γύρω από τον Ήλιο· επιπλέον θα τοποθέτησε ολόκληρο το σύστημα μέσα στη σφαίρα των απλανών αστερών, η οποία ως εκ τούτου θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε ηρεμία σε σχέση με το κέντρο του σύμπαντος.

Η ηλιοκεντρική αυτή υπόθεση έχει ένα άμεσο πλεονέκτημα. Εξηγεί την ενοχλητική παρατήρηση ότι οι πλανήτες είναι άλλοτε κοντύτερα και άλλοτε μακρύτερα από τη Γη. Ο αρχαίος κόσμος, όμως, ανακάλυψε στην πρόταση του Αρίσταρχου τρία πολύ σοβαρά μειονεκτήματα:

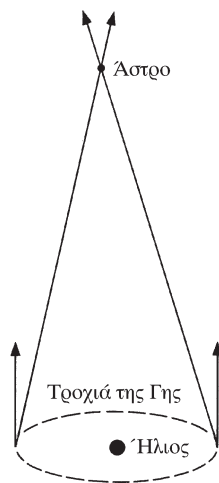
Πρώτον, παραβίαζε φιλοσοφικά δόγματα (π.χ. τη θέση ότι η Γη, λόγω ακριβώς της «ακινήσιας» της και της θέσης της, διαφοροποιείται από τα «ουράνια σώματα» και ότι ο φυσικός «τόπος» της Γης είναι το κέντρο του σύμπαντος). Μάλιστα, οι σύγχρονοι του θεώ-

ρησαν τον Αρίσταρχο ασεβή «επειδή έθεσε σε κίνηση την εστία του Σύμπαντος». Επιπλέον, η καινούργια εικόνα του ηλιακού συστήματος ερχόταν σε αντίθεση με τον κοινό νοο και την καθημερινή εμπειρία· οι ίδιοι οι όροι που χρησιμοποιούνται στην Αστρονομία (ανατολή του Ήλιου, πρόοδος των πλανητών κ.λπ.) αντανακλούν τη διαισθητική βεβαιότητα ότι η Γη πρέπει να βρίσκεται σε ηρεμία.

Πρόβλημα 1.2 Παραθέστε τις καθημερινές παρατηρήσεις σχετικά με τον Ήλιο, τα άστρα και τους πλανήτες, από τις οποίες προέκυψε, προφανώς με εξαιρετική πειστικότητα, η γεωκεντρική θεωρία. Προσέξτε να μην προϋποθέσετε τη γεωκεντρική ή κάποια άλλη θεωρία στην περιγραφή σας.

Δεύτερον, ο Αρίσταρχος δεν φαίνεται να είχε ενισχύσει το σύστημά του με λεπτομερείς υπολογισμούς και ποσοτικές προβλέψεις των πλανητικών τροχιών, κάτι που με τα σημερινά μας κριτήρια θα ήταν μία προφανής συνθήκη για να εξασφαλισθεί η αναγνώριση μιας θεωρίας στις φυσικές επιστήμες. Η υπόθεσή του φαίνεται να ήταν αμιγώς ποιοτική, αν και όσον αφορά άλλα επιτεύγματά του αναφέρεται ότι είχε επιδείξει αξιοσημείωτες μαθηματικές ικανότητες.

Τρίτον, οι αρχαίοι Έλληνες στοχαστές επεξεργάστηκαν ένα ιδιοφυές επιχείρημα για να ανασκευάσουν τον Αρίσταρχο. Αν η Γη κινείται γύρω από τον Ήλιο, η μεγάλη τροχιά της άλλοτε θα την φέρνει κοντά σε κάποιο δεδομένο απλανή αστέρα στην ουράνια σφαίρα και άλλοτε θα την απομακρύνει από αυτόν. Κατά συνέπεια, η γωνία κατά την οποία βλέπουμε αυτό το άστρο θα είναι διαφορετική σε διαφορετικά σημεία της ετήσιας περιστροφής της Γης (βλ. Σχ. 1.5). Το φαινόμενο αυτό, το οποίο ονομάζεται ετήσια *παράλλαξη* των απλανών, προβλέπεται από την ηλιοκεντρική υπόθεση



Σχ. 1.5 Η παράλλαξη ενός άστρου όπως φαίνεται από τη Γη. Το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα· το άστρο είναι πολύ πιο μακριά σε σχέση με το μέγεθος της τροχιάς της Γης.

του Αρίσταρχου, αλλά δεν είχε παρατηρηθεί από τους Έλληνες αστρονόμους.

Για να εξηγήσουμε το πρόβλημα, θα μπορούσαμε να πούμε είτε (α) ότι η αστρική παράλλαξη είναι τόσο μικρή, ώστε δεν μπορεί να παρατηρηθεί διά γυμνού οφθαλμού – το οποίο με τη σειρά του συνεπάγεται ότι η απόσταση των απλανών αστείων είναι αφάνταστα μεγαλύτερη σε σύγκριση με τη διάμετρο της ετήσιας τροχιάς της Γης, είτε (β) ότι ο Αρίσταρχος έκανε λάθος και η Γη δεν περιφέρεται μέσα στην ουράνια σφαίρα. Δεν είναι λοιπόν περίεργο που οι αρχαίοι, προδιατεθειμένοι να απορρίψουν το ηλιοκεντρικό σύστημα και αισθανόμενοι αποστροφή προς την ιδέα ενός άπειρα εκτεταμένου σύμπαντος, επέλεξαν τη δεύτερη από αυτές τις εναλλακτικές λύσεις. Ωστόσο, η πρώτη ήταν που αποδείχθηκε τελικά η ορθή. Η παράλλαξη υπήρχε πράγματι, αν και είναι τόσο μικρή,

που ακόμα και οι τηλεσκοπικές μετρήσεις δεν την αποκάλυψαν μέχρι το 1838.

Πρόβλημα 1.3 Η ετήσια παράλλαξη ενός άστρου μπορεί χοντρικά να ορισθεί ως το μισό της γωνίας μεταξύ των δύο γραμμών που ενώνουν το κέντρο της Γης με αυτό το άστρο, ενώ η Γη βρίσκεται στα αντίθετα άκρα μιας διαμέτρου της ετήσιας τροχιάς της. Αφού οι αρχαίοι Έλληνες δεν μπορούσαν να ανιχνεύσουν την παράλλαξη, και δεδομένου ότι η ακρίβεια των μετρήσεών τους ήταν συχνά μόνο περίπου $\frac{1}{2}^\circ$, πόση πρέπει να είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της τροχιάς της Γης και του πλησιέστερου απλανούς αστεία; [Εκφράστε το αποτέλεσμα σε αστρονομικές μονάδες (Α.Υ.), όπου μία Α.Υ. είναι η μέση απόσταση του Ήλιου από τη Γη και ισούται με 150×10^6 χιλιόμετρα περίπου]. Ο Μπέσελ (F. W. Bessel) παρατήρησε πρώτος την ετήσια παράλλαξη το 1838· για το πλησιέστερο λαμπερό άστρο, το α του Κενταύρου, η παράλλαξη είναι της τάξης των $\frac{3}{4}$ δευτέρων λεπτών της μοίρας. Πόση είναι κατά προσέγγιση η απόστασή του; (Τα σύγχρονα τηλεσκόπια μπορούν να μετρήσουν παραλλάξεις της τάξης του $0,01''$ και άρα μπορούν να προσδιορίσουν άμεσα αποστάσεις άστρων τα οποία βρίσκονται περίπου 100 φορές μακρύτερα από το α του Κενταύρου).

Οι ηλιοκεντρικές θεωρίες του Αρίσταρχου και άλλων, άσκησαν τόσο μικρή επίδραση στην αρχαία ελληνική σκέψη, ώστε κανονικά δεν θα έπρεπε να ασχοληθούμε καθόλου μαζί τους. Αλλά αυτές οι ευφάνταστες υποθέσεις κέντρισαν την αποφασιστική εργασία του Κοπέρνικου 18 αιώνες αργότερα. Προφανώς, οι γόνιμες ιδέες δεν περιορίζονται από τον χώρο και τον χρόνο και ποτέ δεν μπορούν αποτιμηθούν *τελικά* με βεβαιότητα.

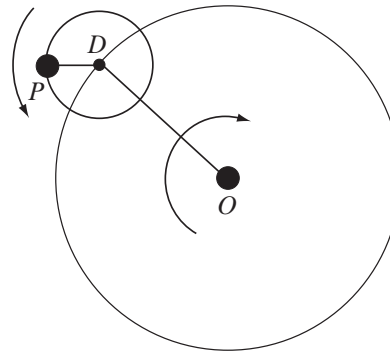
1.6 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΓΕΩΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ

Ας στραφούμε τώρα στον άλλο, και πολύ πιο ρωμαλέο, βλαστό των πρώιμων αστρονομικών μοντέλων. Το πρόβλημα ήταν να επιτραπεί στους πλανήτες να έχουν μεταβλητές αποστάσεις από τη Γη στα πλαίσια των παραδεδομένων πεποιθήσεων περί ακινησίας της Γης. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, το σύστημα των ομόκεντρων σφαιρών τροποποιήθηκε με ιδιοφυείς τρόπους, κυρίως από τον Απολλώνιο*, τον Ίππαρχο** και τελικά τον σημαντικό αστρονόμο και γεωγράφο Κλαύδιο Πτολεμαίο (2ος αιώνας μ.Χ.)***.

* Ο Απολλώνιος (3ος αιώνας π.Χ.) πρότεινε την ιδέα του επικύκλου¹ μελέτησε επίσης, χωρίς αναφορά στην Αστρονομία, τις ιδιότητες κωνικών τομών όπως η παραβολή και η έλλειψη, οι οποίες απέκτησαν ιδιαίτερη σημασία στις θεωρίες του Κέπλερ και του Νεύτωνα κατά τον 17ο αιώνα (βλ. Κεφάλαια 4 και 11).

** Ο Ίππαρχος (2ος αιώνας π.Χ.) ανέπτυξε μια μέθοδο υπολογισμού ισοδύναμη με αυτό που ονομάζουμε σήμερα τριγωνομετρία. Το έργο του σχετικά με τις κινήσεις του Ήλιου, της Σελήνης και των πλανητών ενσωματώθηκε στο πτολεμαϊκό σύστημα. Καθώς οι περισσότερες πληροφορίες που διαθέτουμε σχετικά με το έργο του Ίππαρχου προέρχονται από ασαφείς αναφορές του Πτολεμαίου, είναι δύσκολο να αποτιμηθεί η προσφορά του καθενός στη δημιουργία του «πτολεμαϊκού συστήματος». Στον Ίππαρχο αποδίδεται επίσης η ανακάλυψη της μετάπτωσης των ισημεριών, αν και κάποια πράγματα πιθανόν να ήταν γνωστά για αυτό το φαινόμενο πολύ πριν από αυτόν.

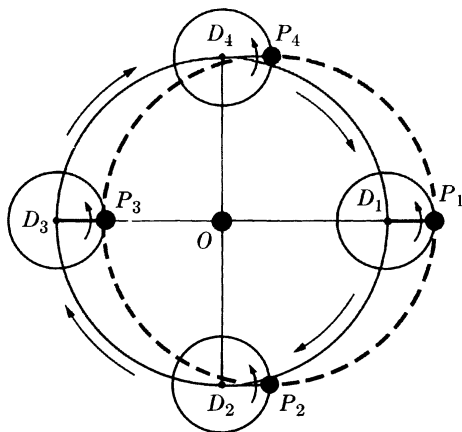
*** Σημειώστε το τεράστιο χρονικό διάστημα μεταξύ του Ίππαρχου και του Πτολεμαίου. Δεν διαθέτουμε μαρτυρίες για κάποια σημαντική συνεισφορά στην Αστρονομία κατά τη διάρκεια της περιόδου που περιλαμβάνει την άνοδο της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας και την εμφάνιση του Χριστιανισμού.



Σχ. 1.6 Παράδειγμα επικυκλικής κίνησης ενός πλανήτη P.

α) *Έκκεντρη κίνηση*. Αν η ακίνητη Γη δεν ήταν ακριβώς στο κέντρο της περιστροφής ενός ομαλά κινούμενου ουράνιου σώματος, το τελευταίο (παρατηρούμενο από τη Γη) θα ακολουθούσε *έκκεντρη* τροχιά και η απόστασή του από τη Γη θα μεταβαλλόταν. Το μοντέλο αυτό περιγράφει αρκετά καλά τη φαινόμενη ετήσια κίνηση του Ήλιου, καθώς στο βόρειο ημισφαίριο ο Ήλιος φαίνεται μεγαλύτερος (και άρα κοντύτερα) τα μεσημέρια του χειμώνα σε σύγκριση με τα μεσημέρια του καλοκαιριού. Σημειώστε ότι με την εισαγωγή των έκκεντρων κινήσεων οι αστρονόμοι στην ουσία παρέκαμπταν την παλαιότερη αρχή που απαιτούσε οι πλανητικές κινήσεις να είναι κυκλικές γύρω από το κέντρο της Γης.

β) *Επικυκλική κίνηση*. Το Σχ. 1.6 παριστάνει ένα σώμα P (όπως ο Ήλιος ή ένας πλανήτης) το οποίο εκτελεί ταυτόχρονα δύο ομαλές περιστροφικές κινήσεις: (α) την περιστροφή γύρω από ένα σημείο D (στο διάστημα) με ακτίνα PD και (β) την περιστροφή με ακτίνα OD γύρω από το σημείο O (τη θέση της Γης). Ο μικρός κύκλος ονομάζεται *επίκυκλος* και ο μεγάλος κύκλος *φέρων*. Οι δύο κινήσεις ενδέχεται να έχουν εντελώς ανε-



Σχ. 1.7 Έκκεντρη τροχιά που προκύπτει από επικυκλική κίνηση.

ξάρτητες ταχύτητες, φορές και ακτίνες. Το Σχ. 1.7 παρουσιάζει την ειδική περίπτωση στην οποία το μοντέλο των επικύκλων οδηγεί σε έκκεντρη τροχιά (η διακεκομμένη γραμμή) και το Σχ. 1.8 παρουσιάζει, με τη βοήθεια της διακεκομμένης γραμμής που συνδέει 24 διαδοχικές θέσεις του P , την πολύπλοκη κίνηση η οποία προκύπτει αν το P περιστρέφεται γύρω από το D πολλές φορές κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του D γύρω από το O .

Πρόβλημα 1.4 Ποιος είναι ο λόγος των ταχυτήτων περιστροφής γύρω από τον επίκυκλο και τον φέροντα κύκλο στο Σχ. 1.8; Πώς θα ήταν η τροχιά, αν ο λόγος ήταν ακριβώς 3:1;

Αυτό το τελευταίο είδος κίνησης παρουσιάζει πράγματι τις περισσότερες από τις παρατηρούμενες επιπλοκές των τροχιών των πλανητών, όπως αυτές παρατηρούνται από τη Γη με φόντο τους απλανείς αστέρες. Προσέξτε ιδιαίτερα την αντιστροφή κατεύθυνσης της κίνησης (*παλινδρομική κίνηση*) στις θέσεις P_4 , P_{11} , και P_{18} .

Η τροχιά του Δία, η οποία περιέχει 11 τέτοιους βρόχους, καλύπτεται περίπου σε 12 χρόνια για μια πλήρη περιφορά γύρω από τη Γη.

Με την κατάλληλη επιλογή ακτίνων, ταχυτήτων και φορών, μια επικυκλική κίνηση μπορεί εξίσου καλά να οδηγήσει σε μια έκκεντρη τροχιά. Ο Πτολεμαίος χρησιμοποίησε τότε το ένα και τότε το άλλο μοντέλο και ορισμένες φορές συνδυασμούς τους, ανάλογα με το πρόβλημα. Ας σημειώσουμε επίσης ότι το μοντέλο της επικυκλικής κίνησης πάσχει από τις ίδιες φιλοσοφικές δυσκολίες με εκείνο της έκκεντρης κίνησης. Η περιστροφή του P γύρω από το D , αν θέλουμε να είμαστε αυστηροί, έρχεται σε αντίθεση με τα παλαιότερα αξιώματα, όπως έρχεται και η κυκλική κίνηση του P γύρω από κάποιο κέντρο άλλο από τη Γη.

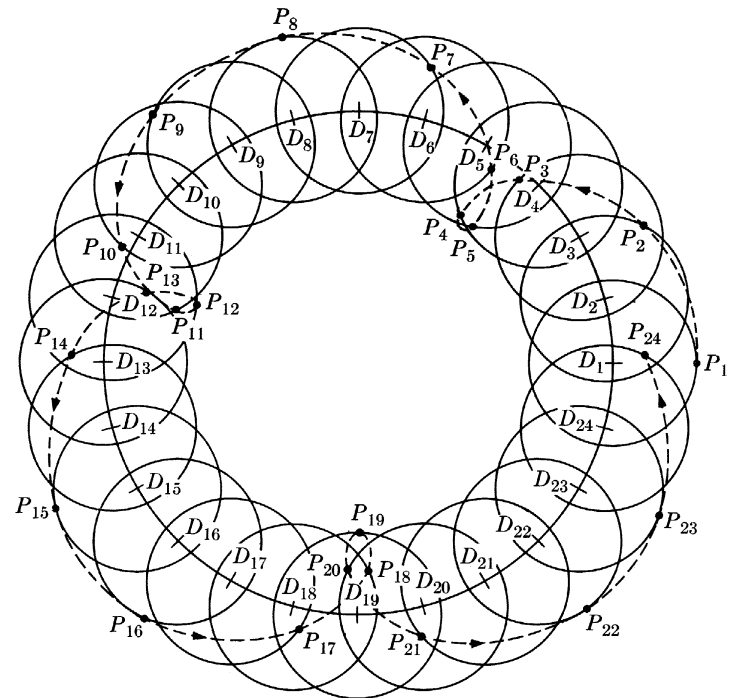
Πρόβλημα 1.5 Σχεδιάστε όσο καλύτερα μπορείτε, με χάρακα και διαβήτη, την τροχιά του P (όπως στο Σχ. 1.7), αν το P περιστρέφεται δύο φορές γύρω από το D στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για μια πλήρη περιστροφή του D γύρω από το O .

Πρόβλημα 1.6 Από παρατηρήσεις μπορούμε να διατυπώσουμε τις ακόλουθες υποθέσεις. Ο Ήλιος κινείται γύρω από τη Γη καθημερινά από τα ανατολικά προς τα δυτικά, όπως και η σφαίρα των απλανών· η περιστροφή του Ήλιου διαρκεί όμως περίπου τέσσερα λεπτά ανά ημέρα περισσότερο. Ο Ήλιος επίσης πλησιάζει τη Γη στη διάρκεια του χειμώνα (για παρατηρητές που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο) και απομακρύνεται το καλοκαίρι· επιπλέον κινείται αργά βόρεια του ισημερινού το καλοκαίρι και νότια του ισημερινού τον χειμώνα. Ποια από αυτά τα χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να αποδοθούν από το σφαιρικό μοντέλο που φαίνεται στο Σχ. 1.2 και ποια από αυτά δεν μπορούν; Επινοήστε και σχεδιάστε χοντρικά ένα ποιοτικό γεωκεντρικό μοντέλο

για αυτές τις κινήσεις του Ήλιου γύρω από τη Γη, χρησιμοποιώντας τις ιδέες που περιγράψαμε παραπάνω.

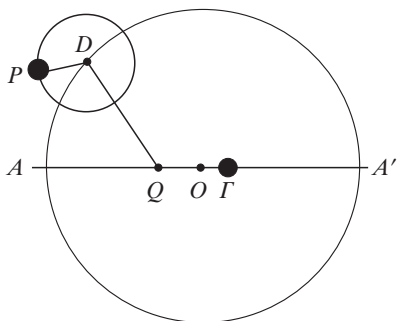
Μπορούμε τώρα να συνοψίσουμε τα πλατωνικά και αριστοτελικά στοιχεία που διατηρούνται στο πτολεμαϊκό σύστημα, καθώς και αυτά που έχουν τροποποιηθεί. Οι έννοιες της *ομαλής κυκλικής κίνησης* και της *ακίνητης Γης* χρησιμοποιούνται ακόμη. Το μοντέλο των ομόκεντρων σφαιρών γύρω από τη Γη, και μαζί του το αίτημα η Γη να βρίσκεται στο κέντρο όλων των περιστροφών, έχει εξαφανισθεί. Αυτό γίνεται ακόμη περισσότερο φανερό, όταν διαπιστώνουμε ότι ο Πτολεμαίος θεώρησε αναγκαίο να προσθέσει ένα ακόμη επινόημα για να περιγράψει με μεγαλύτερη ακρίβεια ορισμένα χαρακτηριστικά των ουράνιων κινήσεων. Πρόκειται για το επινόημα του *εξισωτή*.

γ) Ο *εξισωτής*. Ο Ήλιος καλύπτει τη μισή τροχιά του ανάμεσα στα άστρα (δηλ. τις 180° από τις 360° ενός πλήρους κύκλου) μεταξύ της εαρινής ισημερίας (21 Μαρτίου) και της φθινοπωρινής ισημερίας (23 Σεπτεμβρίου). Κατόπιν συμπληρώνει το υπόλοιπο μισό του κύκλου από την 23η Σεπτεμβρίου μέχρι την 21η Μαρτίου. Κατά συνέπεια, ο Ήλιος φαίνεται να κινείται λίγο πιο αργά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και λίγο πιο γρήγορα κατά τη διάρκεια του χειμώνα· χρειάζεται περίπου 6 ημέρες παραπάνω να διασχίσει την ίδια *γωνιακή* απόσταση (μετρούμενη με βάση την ουράνια σφαίρα) το καλοκαίρι από ό,τι τον χειμώνα. Το γεγονός αυτό δεν θα μπορούσε ποτέ να εξηγηθεί με κάποιο συνδυασμό περιστρεφόμενων σφαιρών ή επικύκλων, καθώς υποτίθεται πάντα ότι ο ρυθμός της κυκλικής περιστροφής είναι σταθερός και ίσες γωνίες καλύπτονται σε ίσους χρόνους. Ανάλογες, αλλά λιγότερο προφανείς, δυσκολίες δημιουργούνται και στην περίπτωση πλανητικών κινήσεων.



Σχ. 1.8 Επικυκλική κίνηση του P , που παρουσιάζει τρεις προσωρινές αντιστροφές της κατεύθυνσης της κίνησης στα σημεία P_4 , P_{11} , και P_{18} . (Προέρχεται από το βιβλίο των M. Cohen και I. Drabkin με κάποιες προσαρμογές).

Το πτολεμαϊκό επινόημα του *εξισωτή* φαίνεται στο Σχ. 1.9. Ένα σώμα P κινείται κυκλικά γύρω από το D , το οποίο με τη σειρά του κινείται σε κύκλο με κέντρο το O . Η Γη ενδέχεται να βρίσκεται στο O ή, αν έχουμε συνδυασμό επικυκλικής και έκκεντρης κίνησης, η Γη θα μπορούσε να βρίσκεται οπουδήποτε στο ευθύγραμμο τμήμα AA' , ας πούμε στο σημείο Γ . Μέχρι στιγμής, η κίνηση του D θεωρείται ομαλή ως προς το O , αλλά για να περιγράψει τις ακανόνιστες κινήσεις του Ήλιου και των πλανητών, που αναφέραμε παραπάνω, ο Πτολεμαίος θεώρησε ότι το D θα μπορούσε να περιστρέφεται ομαλά γύρω από κάποιο άλλο σημείο, το Q , που



Σχ. 1.9 Κίνηση ως προς τον εξισωτή στο σημείο Q.

ονομάζεται εξισωτής. Με άλλα λόγια, η γωνία DQA μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό, καθώς το D διαγράφει την κυκλική τροχιά του. Για να κυριολεκτήσουμε, το D δεν εκτελεί πλέον ομαλή κυκλική κίνηση, αν και η κίνησή του είναι ακόμη *ομαλή* (ως προς το Q) και *κυκλική* (ως προς το O).

Για εκείνους τους αστρονόμους των οποίων η μόνη μέριμνα ήταν η «σωτηρία των φαινομένων», δηλαδή η κατασκευή ενός συστήματος που θα επέτρεπε ακριβείς προβλέψεις όλων των ουρανίων φαινομένων, ο εξισωτής αποτελούσε λαμπρή επιτυχία. Αλλά όσοι επιθυμούσαν ένα σύστημα το οποίο θα ήταν συμβατό με γενικές φιλοσοφικές αρχές, όπως η αναγκαιότητα της ομαλής κυκλικής κίνησης, δεν θα ήταν ιδιαίτερα ευχαριστημένοι με τον επιτηδευμένο χαρακτήρα αυτού του τεχνάσματος. Ποιο είναι πιο σημαντικό κριτήριο για μια επιστημονική θεωρία: η ακρίβεια ή η νοητική ευκρίνεια;

Ο ίδιος ο Πτολεμαίος θεωρούσε ότι το σύστημά του ήταν βασισμένο σε ένα σύνολο εύλογων υποθέσεων που θα μπορούσαν να γίνουν αποδεκτές από κάθε αναγνώστη του, ακόμη κι αν αυτός δεν μπορούσε να ακολουθήσει όλες τις λεπτομέρειες των υπολογισμών. Στο μεγάλο έργο του, που είχε τον τίτλο *Μεγίστη Μαθηματική Σύνταξις*, αλλά έγινε ευρύτερα γνωστό αργότερα

με τον τίτλο της αραβικής μετάφρασης ως *Αλμαγέστη*, διατύπωσε αυτές τις υποθέσεις με τον ακόλουθο τρόπο:

- 1) Ο ουρανός έχει σφαιρικό σχήμα και περιστρέφεται ως σφαίρα.
- 2) Η Γη, ως πλήρες όλον, έχει κι αυτή σφαιρικό σχήμα.
- 3) Η Γη βρίσκεται στο μέσον του ουρανού, ως ένα κέντρο.
- 4) Λόγω του μεγέθους της και της απόστασής της από τη σφαίρα των απλανών αστερών, η Γη μπορεί να θεωρηθεί, σε σχέση με αυτήν τη σφαίρα, ως σημείο.
- 5) Η Γη δεν εκτελεί καμία κίνηση.

Επιπλέον, το παλαιότερο δόγμα ότι η ομαλή κυκλική κίνηση είναι η μόνη συμπεριφορά που αρμόζει στα ουράνια σώματα περιέχεται εμμέσως στο έργο του Πτολεμαίου, αν και σε κάπως τροποποιημένη μορφή.

Πρόβλημα 1.7 Ποια είναι η σημασία της τέταρτης από τις προκαταρκτικές υποθέσεις του Πτολεμαίου;

1.7 Η ΕΠΙΤΥΧΙΑ ΤΟΥ ΠΤΟΛΕΜΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Επιλέγοντας κατάλληλα σε κάθε περίπτωση τους άξονες, τις φορές των κινήσεων, τους ρυθμούς και τις ακτίνες των περιστροφών, τον αριθμό και το μέγεθος των επικύκλων, τις θέσεις των εκκέντρων και των εξισωτών, προσαρμόζοντας με τη βοήθεια δοκιμών τα μοντέλα του στις παρατηρούμενες τροχιές, χρησιμοποιώντας τα επιμέρους αποτελέσματα γενεών προγενεστέρων αστρονόμων – με αυτόν τον τρόπο ο Πτολεμαίος κατάφερε να συγκροτήσει ένα θεωρητικό εργαλείο, το οποίο διατήρησε τη χρησιμότητά του για την Αστρονομία, τη ναυσιπλοΐα και την αστρολογία για περισσότερους από 14 αιώνες. Το πτολεμαϊκό σύστημα ήταν μια απάντηση

στην αρχική ερώτηση του Πλάτωνα και, συνολικά, συνιστά ένα μεγαλειώδες έργο. Ένα από τα ευχάριστα χαρακτηριστικά του ήταν το γεγονός ότι τα κέντρα των επικύκλων της Σελήνης, του Ερμή, και της Αφροδίτης βρίσκονταν στην ίδια ευθεία μεταξύ της Γης και του Ήλιου (βλ. Σχ. 1.10).

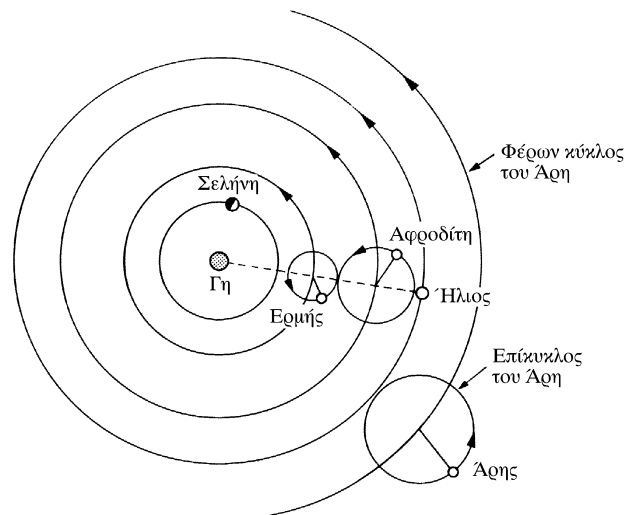
Όμως, η πολυπλοκότητα και η ανακρίβεια ως προς ορισμένες λεπτομέρειες που χαρακτηρίζαν ολόκληρο το σύστημα ήταν αξιοσημείωτες, ενώ μεταγενέστερες παρατηρήσεις απαιτούσαν, από καιρού εις καιρόν, την τροποποίηση κάποιων χαρακτηριστικών του μοντέλου, π.χ. την αλλαγή ενός εξισωτή ή την πρόσθεση ενός ακόμη επικύκλου. Μέχρι την εποχή του Κοπέρνικου, το γεωκεντρικό σύστημα απαιτούσε περισσότερες από 70 ταυτόχρονες κινήσεις για τα επτά ουράνια σώματα. Αλλά, σε αντιδιαστολή, υπήρχαν πέντε ισχυροί λόγοι για τους οποίους το σύστημα γινόταν γενικά αποδεκτό όπου γινόταν γνωστό.

α) Προσέφερε μια επαρκώς ακριβή περιγραφή των φαινομένων που ήταν παρατηρήσιμα με τη βοήθεια των οργάνων της εποχής.

β) Προέβλεπε τις μελλοντικές θέσεις των πλανητών με ικανοποιητικό, ως προς τις ανάγκες της εποχής, τρόπο, ακόμη και αν απαιτούνταν επίπονοι υπολογισμοί. Επιπλέον, αν προέκυπτε κάποια σοβαρή διάσταση μεταξύ των προβλέψεων και των παρατηρήσεων, αυτή μπορούσε να αντιμετωπισθεί με μία σχετικά περιορισμένη επαναδιευθέτηση των γραναζιών αυτού του εύελικτου μηχανισμού. Σήμερα, όπως και σε εκείνη την εποχή, το γεωκεντρικό σύστημα προτιμάται ακόμη για υπολογισμούς στη ναυσιπλοΐα – και στην αστρολογία!

γ) Εξηγεί φυσιολογικά την απουσία ετήσιας παράλλαξης των απλανών αστερών.

δ) Στα περισσότερα σημεία συνέπιπτε με τις ελληνικές φιλοσοφικές και φυσικές δοξασίες σχετικά με τη



Σχ. 1.10 Μερική και σχηματική απεικόνιση του πτολεμαϊκού συστήματος πλανητικής κίνησης.

φύση της Γης και των ουράνιων σωμάτων. Αργότερα, όταν εισήχθη ξανά στην Ευρώπη από τους Άραβες, το πτολεμαϊκό σύστημα* επενδύθηκε με θεολογική σημασία από τους σχολαστικούς. Επιπλέον, ήταν ευθυγραμμισμένο με τη Φυσική της εποχής (π.χ. τις θεωρίες για την κίνηση των βλημάτων), καθώς ήταν βασισμένο στις ίδιες φιλοσοφικές θέσεις σχετικά με τη φυσική κίνηση, τον φυσικό τόπο κ.λπ. (Βλ. Κεφάλαιο 7).

ε) Ήταν ελκυστικό στον κοινό νο. Είναι σχεδόν αναπόφευκτο να έχουμε την πεποίθηση ότι μπορούμε πράγματι να «δούμε» τον Ήλιο και τα άστρα να κινούνται γύρω μας και είναι ανακουφιστικό να σκεφτόμαστε ότι βρισκόμαστε πάνω σε μια σταθερή και ακίνητη Γη.

* Σε σχέση με τη μελέτη του πτολεμαϊκού συστήματος σίγουρα δεν υπάρχει πιο συναρπαστική εμπειρία από την ανάγνωση της γνωστότερης ξενάγησης στο μεσαιωνικό σύμπαν, του *Παραδείσου* του Δάντη.

Παρ' όλα αυτά όμως, η θεωρία του Πτολεμαίου αντικαταστάθηκε τελικά από μια ηλιοκεντρική θεωρία. Γιατί συνέβη αυτό; Ποιες ήταν οι σημαντικότερες ελλείψεις της πτολεμαϊκής εικόνας; Από τη σύγχρονη οπτική γωνία, τότε είναι μια επιστημονική θεωρία επιτυχής ή ανεπιτυχής; Θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε αυτά τα ερωτήματα λεπτομερώς, αφού πρώτα αποκτήσουμε μια συνοπτική εικόνα του σημαντικότερου αντίπαλου μοντέλου πλανητικής κίνησης.

ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Σημείωση: Ο σκοπός των βιβλίων και των άρθρων στις επόμενες σελίδες είναι να οδηγήσουν όσους επιθυμούν να μελετήσουν το θέμα περαιτέρω σε πηγές που προσφέρουν χρήσιμα ερεθίσματα. Τα έργα που περιέχονται στην κατηγορία «Συστάσεις για Περαιτέρω Μελέτη» είναι γενικά γραμμένα σε ένα επίπεδο που, από τεχνική άποψη, δεν ξεπερνά αυτό του παρόντος κειμένου. Από την άλλη πλευρά, τα κείμενα στην κατηγορία «Πηγές, Ερμηνείες, και Έργα Αναφοράς» προορίζονται κυρίως για πιο προχωρημένους σπουδαστές ή για διδάσκοντες. Συνιστούμε ιδιαίτερα τα αποσπάσματα από πρωτότυπα έργα, καθώς, όπως έγραψε και ο επιστήμονας-φιλόσοφος Ερνστ Μαχ (Ernst Mach), «Δεν υπάρχει θέμα περισσότερο μεγαλειώδες ή θέμα που να εξυψώνει πνευματικά περισσότερο από αυτό που μας προσφέρει ο λόγος των μεγάλων ερευνητών με τη γιγαντιαία δύναμή τους».

M. Clagett, *Greek Science in Antiquity*, New York: Abelard Schuman, 1955.

B. Farrington, *Science in Antiquity*, New York: Oxford University Press, δεύτερη έκδοση, 1969.

D. L. Hurd και J. J. Kipling, *The Origins and Growth of Physical Science*, Baltimore Md: Penguin Books, 1964.

Βλ. ιδιαίτερα τα αποσπάσματα από τα γραπτά του Αριστοτέλη και του Πτολεμαίου (τ. 1, σελ. 28-32 και 64-71).

E. C. Kemble, *Physical Science: Its Structure and Development*, Cambridge Mass., M.I.T. Press, 1966. Τόμος 1, Κεφ. 1-3.

T. S. Kuhn, *The Copernican Revolution*, Cambridge Mass., Harvard University Press, 1957. Κεφ. 1-3.

R. M. Palter (επιμ.), *Toward Modern Science*, New York: Farrar, Straus & Cudahy, 1961. Βλ. τα άρθρα για την αρχαία ελληνική και τη μεσαιωνική επιστήμη στον πρώτο τόμο.

G. Sarton, *Ancient Science and Modern Civilization*, Lincoln, Neb.: University of Nebraska Press, 1954. Τρία δοκίμια που ασχολούνται με τον ελληνικό κόσμο όπως εκφράζεται στα πρόσωπα του Ευκλείδη και του Πτολεμαίου και με την παρακμή της αρχαίας ελληνικής επιστήμης και πολιτισμού.

ΠΗΓΕΣ, ΕΡΜΗΝΕΙΕΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Aristotle, *On the Heavens*, μετάφρ. W. K. C. Guthrie, Cambridge Mass.: Harvard University Press, 1939.

A. Berry, *A Short History of Astronomy*, London, 1898. Ανατύπωση σε έκδοση Dover. Κεφ. I-III.

M. R. Cohen και I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science*, New York: McGraw-Hill, 1948. Ανατύπωση από Harvard University Press. Πλήθος υλικού από τις πηγές και διεισδυτικά σχόλια· βλ. σελ. 90-143 για την Αστρονομία.

D. R. Dicks, *Early Greek Astronomy to Aristotle*, Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 1970.

J. L. E. Dreyer, *A History of Astronomy*, New York: Dover, 1953. Κεφ. I-XI (περισσότερο λεπτομερές από το βιβλίο του Berry που αναφέρεται παραπάνω).

Pierre Duhem, *To Save the Phenomena, an Essay on the Idea of Physical Theory from Plato to Galileo*, μετάφρ. από τη γαλλική έκδοση του 1908 από τους E. Doland και C. Maschler. Chicago: University of Chicago Press, 1969. Κεφ. 1-3.

W. Jaeger, *Aristotle*, Oxford: Clarendon Press, δεύτερη έκδοση, 1948.

M. K. Munitz (επιμ.), *Theories of the Universe*, New York: Free Press (Macmillan), 1957. Μια πολύτιμη συλλογή πηγών και ιστορικών άρθρων· βλ. σελ. 1-138.

O. Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, Providence: Brown University Press, δεύτερη έκδοση, 1957. Ανατύπωση Dover. Αιγυπτιακά, βαβυλωνιακά και ελληνικά Μαθηματικά και Αστρονομία.

Ptolemy, *The Almagest*, μετάφρ. R. C. Taliaferro, στη σειρά *Great Books of the Western World* (επιμ. R. M. Hutchins), Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1939, 1952, τ. 16.

G. Sarton, *A History of Science*, Cambridge Mass.: Harvard University Press, 1952, 1959. Δύο τόμοι για την αρχαία ελληνική επιστήμη· δυστυχώς ο Σάρτον δεν κατάφερε να ολοκληρώσει το έργο πριν από τον θάνατό του.

F. Solmsen, *Aristotle's System of the Physical World*, Ithaca N.Y.: Cornell University Press, 1960.

ΓΕΝΙΚΑ ΒΙΒΛΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

(Τα βιβλία αυτά ασχολούνται κυρίως με την προ του 20ού αιώνα περίοδο. Βλ. το τέλος του Κεφαλαίου 26 για έναν κατάλογο βιβλίων που ασχολούνται με την ιστορία της σύγχρονης επιστήμης.)

J. D. Bernal, *The Extension of Man. A History of Physics before 1900*, London: Weidenfeld and Nicolson, 1972.

J. D. Bernal, *Science in History*, New York: Watts, τρίτη έκδοση, 1965.

S. G. Brush (επιμ.), *Resources for the History of Physics*, Hanover, N.H.: University Press of New England, 1972.

I. B. Cohen, *The Birth of a New Physics*, Garden City, N.Y.: Doubleday, Anchor Books, 1960. Μια σύντομη και ευανάγνωστη έκθεση που καλύπτει τα περισσότερα από τα θέματα που συζητούνται στα Μέρη Α, Β, και Γ του παρόντος βιβλίου.

R. G. Collingwood, *The Idea of Nature*, New York: Oxford University Press, 1945. Μια επισκόπηση των μεταφυσικών ιδεών της αρχαίας και της πρώιμης νεότερης επιστήμης.

W. C. Dampier, *A History of Science*, New York: Cambridge University Press, τέταρτη έκδοση, 1948.

C. C. Gillispie, *The Edge of Objectivity*, Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1960. Μια συζήτηση που απευθύνεται σε αναγνώστες ήδη εξοικειωμένους με τα σημαντικότερα γεγονότα της ιστορίας της επιστήμης.

C. C. Gillispie (επιμ.), *Dictionary of Scientific Biography*, New York: Scribner, 1970-. Όταν ολοκληρωθεί, το έργο αυτό θα αποτελεί την πλέον ευρεία και έγκυρη διαθέσιμη πραγματεία για την ιστορία της επιστήμης και μια ανεκτίμητη πηγή πληροφοριών για τη ζωή και τα επιτεύγματα χιλιάδων επιστημόνων.

A. R. Hall, *The Scientific Revolution 1500-1800*, Boston: Beacon Press, 1954.

O. Lodge, *Pioneers of Science*, London, 1893. Ανατύπωση Dover.

S. Mason, *A History of the Sciences*, Collier Books (Macmillan), 1962.

G. de Santillana, *The Origins of Modern Scientific Thought, from Anaximander to Proclus, 600 B.C. to 500 A.D.*, Chicago: University of Chicago Press. Mentor Books, 1961.

C. J. Schneer, *The Search for Order*, New York: Harper, 1960. Ανατυπώθηκε ως *The Evolution of Physical Science* από το Grove Press.

L. W. Taylor, *Physics the Pioneer Science*. Ανατύπωση Dover της έκδοσης του 1941.

S. Toulmin και J. Goodfield, *The Fabric of the Heavens*, New York: Harper, 1961. *The Architecture of Matter*,

New York: Harper, 1962. Οι δύο πρώτοι τόμοι μιας τετράτομης σειράς για την ιστορία της επιστήμης.

W. P. D. Wightman, *The Growth of Scientific Ideas*, New Haven: Yale University Press, 1951.

A. Wolf, *A History of Science, Technology, and Philosophy in the XVIth and XVIIth Centuries*, και ομοίως για τον 18ο αιώνα, New York: Macmillan, 1935 και 1939. Ανατύπωση Harper Torchbook. Χρήσιμο γενικά για το ιστορικό του υλικό (παρουσιασμένο θεματολογικά) και για την εικονογράφηση.