

Π.Ε. Χριστοπούλου - Χ. Γούδης

# Εισαγωγή στην Αστρονομία και Αστροφυσική

---

16 Δεκεμβρίου 2011



---

# Περιεχόμενα

---

<b>1</b>	<b>Το γεωκεντρικό και ηλιοκεντρικό σύστημα</b>	<b>1</b>
1.1	Το γεωκεντρικό σύστημα . . . . .	1
1.2	Η ηλιοκεντρική υπόθεση . . . . .	3
1.2.1	Οι νόμοι του Kepler . . . . .	5
1.2.2	Οι παρατηρήσεις του Galileo . . . . .	8
1.2.3	Οι νόμοι του Newton . . . . .	9
1.3	Παλίρροιες . . . . .	16
1.4	Τα σημεία Lagrange . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Ουράνιες κινήσεις</b>	<b>25</b>
2.1	Οι αστερισμοί . . . . .	25
2.1.1	Η ονομασία των αστέρων . . . . .	29
2.2	Η ουράνια σφαίρα . . . . .	29
2.2.1	Ουρανογραφικές συντεταγμένες . . . . .	31
2.2.2	Το σύστημα συντεταγμένων του παρατηρητή. Οριζόντιο ή αλταζιμουθιακό σύστημα . . . . .	32
2.2.3	Σχέση μεταξύ του ουρανογραφικού συστήματος και του αλταζιμουθιακού . . . . .	34
2.2.4	Ισημερινές συντεταγμένες . . . . .	38
2.2.5	Εκλειπτικές (Ηλιακές) συντεταγμένες . . . . .	39
2.2.6	Γαλαξιακές συντεταγμένες . . . . .	41
2.3	Ουράνιες κινήσεις . . . . .	42
2.4	Φαινόμενη κίνηση του Ήλιου στην ουράνια σφαίρα - Εποχές . . . . .	46
2.4.1	Το φαινόμενο των εποχών . . . . .	47
2.4.2	Ισημερίες και ηλιοστάσια . . . . .	48
2.4.3	Οι εποχές στα διάφορα πλάτη . . . . .	50
2.5	Μετάπτωση και κλόνηση του άξονα της Γης . . . . .	52
2.6	Κινήσεις των πλανητών . . . . .	55
2.7	Φάσεις της Σελήνης . . . . .	59
2.7.1	Η διεύθυνση της Σελήνης στον ουρανό σε κάθε φάση . . . . .	60
2.7.2	Το μέγεθος της Πανσελήνου . . . . .	61

2.7.3	Η περιστροφή της Σελήνης . . . . .	63
2.7.4	Η ταχύτητα περιφοράς της Σελήνης . . . . .	65
2.8	Εκλείψεις . . . . .	67
2.9	Ο Χρόνος στην Αστρονομία . . . . .	70
2.9.1	Αστρικός χρόνος . . . . .	71
2.9.2	Ηλιακός χρόνος . . . . .	72
2.9.3	Επίσημος ή πολιτικός χρόνος . . . . .	73
2.9.4	Παγκόσμιος χρόνος (Universal Time, UT) . . . . .	74
2.9.5	Είδη χρόνων . . . . .	75
<b>3</b>	<b>Η φύση του φωτός</b>	<b>77</b>
3.1	Το φως . . . . .	77
3.2	Υπολογισμός της ταχύτητας του φωτός . . . . .	78
3.3	Διάδοση της ακτινοβολίας . . . . .	80
3.4	Ακτινοβολία μέλανος σώματος ή θερμική ακτινοβολία . . . . .	81
3.5	Είδη φασμάτων . . . . .	84
3.6	Ατομικά μοντέλα . . . . .	86
3.6.1	Το μοντέλο του Thomson (το μοντέλο του σταφιδόψωμου) . . . . .	86
3.6.2	Το μοντέλο του Rutherford . . . . .	86
3.6.3	Το μοντέλο του Bohr . . . . .	87
3.6.4	Μοντέλο ηλεκτρονιακού νέφους . . . . .	89
3.6.5	Συμβολισμός των ατομικών καταστάσεων . . . . .	90
3.7	Ερμηνεία των φασματικών γραμμών . . . . .	91
3.8	Το φάσμα του υδρογόνου . . . . .	93
3.9	Μετατόπιση Doppler . . . . .	95
<b>4</b>	<b>Τα τηλεσκόπια</b>	<b>99</b>
4.1	Ατμοσφαιρικά παράθυρα . . . . .	99
4.2	Γενικά χαρακτηριστικά των οπτικών τηλεσκοπίων . . . . .	101
4.2.1	Η διάμετρος του κύριου συλλεκτικού οπτικού στοιχείου . . . . .	102
4.2.2	Το εστιακό μήκος ή εστιακή απόσταση $F$ . . . . .	102
4.2.3	Ο εστιακός λόγος . . . . .	102
4.2.4	Ο προσοφθάλμιος φακός . . . . .	105
4.2.5	Ελάχιστη και Μέγιστη ωφέλιμη μεγέθυνση . . . . .	106
4.2.6	Οπτικό Πεδίο Τηλεσκοπίου . . . . .	106
4.3	Τα είδη των οπτικών τηλεσκοπίων . . . . .	107
4.3.1	Διοπτρικό ή διαθλαστικό τηλεσκόπιο (refractor) . . . . .	107
4.3.2	Κατοπτρικά ή ανακλαστικά τηλεσκόπια (reflectors) . . . . .	108
4.3.3	Καταδιοπτρικά τηλεσκόπια . . . . .	110
4.3.4	Στήριξη των τηλεσκοπίων . . . . .	112
4.4	Ατμοσφαιρικές διαταραχές . . . . .	113

4.5	Καταγραφή εικόνας . . . . .	115
4.6	Ραδιοτηλεσκόπια . . . . .	117
4.7	Τα τηλεσκόπια σύνθετων κατόπτρων . . . . .	118
4.8	Τηλεσκόπια ακτίνων Χ . . . . .	119
<b>5</b>	<b>Το ηλιακό σύστημα</b>	<b>123</b>
5.1	Γενικά Χαρακτηριστικά . . . . .	123
5.1.1	Ο χαρακτηρισμός των πλανητών . . . . .	123
5.1.2	Ταξινόμηση των πλανητών . . . . .	124
5.1.3	Τροχιακά χαρακτηριστικά των πλανητών . . . . .	125
5.1.4	Εποχές . . . . .	128
5.2	Δομή του εσωτερικού των πλανητών . . . . .	130
5.2.1	Το εσωτερικό των γεωειδών πλανητών . . . . .	135
5.2.2	Μοντέλα εσωτερικού πλανητών τύπου Διός . . . . .	136
5.3	Ατμόσφαιρες πλανητών . . . . .	137
5.3.1	ατμόσφαιρες γήινων πλανητών . . . . .	140
5.3.2	Το φαινόμενο του θερμοκηπίου . . . . .	142
5.3.3	Ατμόσφαιρες πλανητών τύπου Διός . . . . .	143
5.4	Οι επιφάνειες των δορυφόρων και των πλανητών . . . . .	146
5.5	Δορυφόροι . . . . .	151
5.6	Δακτύλιοι . . . . .	154
5.7	Υπολείμματα του ηλιακού συστήματος . . . . .	155
5.7.1	Αστεροειδείς . . . . .	156
5.7.2	Κομήτες . . . . .	158
5.7.3	Μετεωρίτες . . . . .	161
5.8	Η δημιουργία του ηλιακού συστήματος . . . . .	163
5.8.1	Η ηλικία του ηλιακού συστήματος . . . . .	165
5.8.2	Ζώνη Kuiper . . . . .	167
<b>6</b>	<b>Ο Ήλιος</b>	<b>169</b>
6.1	Φυσικές παράμετροι του Ήλιου . . . . .	169
6.2	Πηγή ηλιακής ενέργειας . . . . .	172
6.3	Δομή του Ήλιου . . . . .	174
6.4	Το «λυμένο» πρόβλημα των νετρίνων . . . . .	176
6.5	Ηλιακές ταλαντώσεις . . . . .	178
6.6	Χημική σύσταση . . . . .	179
6.7	Φωτόσφαιρα . . . . .	179
6.8	Χρωμόσφαιρα . . . . .	183
6.9	Στέμμα . . . . .	185
6.10	Μηχανισμός θέρμανσης . . . . .	188
6.11	Χαρακτηριστικά της φωτόσφαιρας . . . . .	189

6.11.1	Ηλιακές κηλίδες . . . . .	189
6.11.2	Πυρσοί (Faluae) . . . . .	194
6.11.3	Κοκκίαση . . . . .	194
6.12	Χαρακτηριστικά της χρωμόσφαιρας . . . . .	195
6.12.1	Πίδακες (Spiculae) . . . . .	195
6.12.2	Προεξοχές (prominences), νήματα (filaments) και εκτάσεις (plages) . . . . .	196
6.12.3	Χρωμοσφαιρικό δίκτυο . . . . .	198
6.13	Ενεργός Ήλιος . . . . .	198
6.13.1	Εκλάμψεις (flares) . . . . .	198
6.13.2	Μαζικές στεμματικές εκτινάξεις (Coronal Mass Ejections) . . . . .	199
6.14	Ηλιακός Άνεμος . . . . .	200
6.15	Μοντέλο του Ήλιου . . . . .	203
<b>7</b>	<b>Οι αστέρες</b>	<b>205</b>
7.1	Παρατηρήσιμες ιδιότητες των αστέρων . . . . .	205
7.1.1	Αστρικές αποστάσεις . . . . .	205
7.1.2	Κίνηση των αστέρων . . . . .	207
7.1.3	Φωτεινότητα των αστέρων . . . . .	209
7.1.4	Μεγέθη των αστέρων . . . . .	210
7.1.5	Χρώματα αστέρων και δείκτες χρώματος . . . . .	212
7.1.6	Θερμοκρασία . . . . .	215
7.1.7	Αστρικά φάσματα . . . . .	216
7.1.8	Το διάγραμμα HR . . . . .	221
7.1.9	Αστρικές μάζες - Διπλά συστήματα αστέρων . . . . .	224
7.1.10	Σχέση μάζας και φωτεινότητας . . . . .	227
7.2	Η δομή και η εξέλιξη των αστέρων . . . . .	227
7.2.1	Γέννηση και δομή των αστέρων . . . . .	228
7.2.2	Παραγωγή ενέργειας στους αστέρες . . . . .	231
7.2.3	Μεταφορά ενέργειας . . . . .	233
7.2.4	Εκφυλισμένη ύλη . . . . .	233
7.3	Εξέλιξη αστέρων μικρής μάζας . . . . .	235
7.4	Εξέλιξη αστέρων μεγάλης μάζας . . . . .	237
7.5	Υπερκαινοφανείς . . . . .	239
7.6	Αστρικά σμήνη . . . . .	243
7.7	Αστρικά πτώματα . . . . .	243
7.7.1	Λευκοί νάνοι . . . . .	243
7.7.2	Αστέρες νετρονίων . . . . .	245
7.7.3	Μελανές οπές . . . . .	247
7.8	Μεσοαστρική ύλη . . . . .	249
7.8.1	Ουδέτερο μοριακό υδρογόνο . . . . .	250

---

7.8.2	Μοριακά νέφη . . . . .	251
7.8.3	Περιοχές ιονισμένου υδρογόνου (HII) . . . . .	251
7.8.4	Πλανητικά νεφελώματα . . . . .	253
7.8.5	Υπολείμματα υπερκαινοφανών . . . . .	254
7.8.6	Μεσοαστρική σκόνη . . . . .	256
7.8.7	Κοσμικές ακτίνες . . . . .	259





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

## Το γεωκεντρικό και ηλιοκεντρικό σύστημα

---

### 1.1 Το γεωκεντρικό σύστημα

Οι πρώτες ανθρώπινες προσπάθειες ερμηνείας του ουρανού χρονολογούνται γύρω στο 500 π.Χ. και έγιναν παράλληλα από διάφορους πολιτισμούς στην Ασία, Ινδία, Αμερική και Μεσόγειο από την οποία και προέρχονται οι κυριότερες ιδέες της σύγχρονης αστρονομίας. Οι Βαβυλώνιοι ήταν οι πρώτοι που κατέγραψαν σε πίνακες πολλές από τις ουράνιες κινήσεις (1700 π.Χ.) και μέχρι το 200 π.Χ. μπόρεσαν να προβλέψουν εκλείψεις και κινήσεις πλανητών. Η πρώτη όμως προσπάθεια επινόησης κοσμολογικών μοντέλων ερμηνείας του κόσμου μέσα από τη συστηματική μελέτη και παρατήρηση αποδίδεται στον Έλληνα φιλοσόφους - επιστήμονες της Ιωνίας. Από το 570 π.Χ. ο Πυθαγόρας και η σχολή του ανέπτυξαν την ιδέα της περιγραφής του κόσμου με αριθμούς (γεωμετρία) και υιοθέτησαν την ιδέα της σφαιρικής Γης. Αναζητώντας την ερμηνεία της φαινόμενης κίνησης των πλανητών στον νυχτερινό ουρανό, υπέθεσαν ότι η γη είναι ακίνητη και αποτελεί το κέντρο του Σύμπαντος. Οι αστέρες βρίσκονταν μέσα σε μία ουράνια σφαίρα με κέντρο τη Γη και περιφέρονταν γύρω της μαζί με τους πλανήτες, τη Σελήνη και τον Ήλιο.

Ένας από τους ένθερμους υποστηρικτές αυτού του συστήματος ήταν ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.) ο οποίος εκθέτει στο φιλοσοφικό έργο του «Περί Ουρανού» όχι μόνο τις αστρονομικές του απόψεις αλλά και τη γενική θεωρία για τα τέσσερα στοιχεία των σωμάτων: τη γη, το νερό, τον αέρα και το «πυρ». Ο Αριστοτέλης υποστήριζε ότι εάν η Γη κινείτο θα γινόταν αντιληπτή από την κίνηση του εδάφους ή του αέρα και από την αλλαγή της θέσης των κοντινών αστέρων (φαινόμενο που αργότερα ονομάστηκε παράλλαξη). Στα έργα του επιπλέον παρέχονται ορθές και σαφείς ερμηνείες των φάσεων της Σελήνης και των εκλείψεων - αν και η ερμηνεία τους αποδίδεται στον προγενέστερό του Αναξαγόρα (430 π.Χ.). Ο Αρίσταρχος ο Σάμιος (310-230 π.Χ.), ο τελευταίος από τους πυθαγόριους αστρονόμους, συγκρίνοντας το μέγεθος της σκιάς της Γης στη Σελήνη κατά τη διάρκεια των εκλείψεων υπολόγισε τη σχετική διάμετρο της Σελήνης στο ένα τέταρτο της γήινης. Εκατό

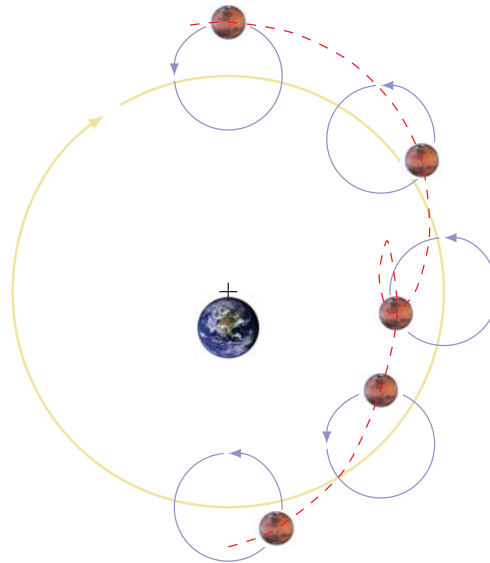
χρόνια αργότερα ο Ερατοσθένης (276-196 π.Χ.) βασιζόμενος σε παρατηρήσεις της θέσης του Ήλιου σε δύο διαφορετικούς τόπους, υπολόγισε με μία πρωτότυπη μαθηματική μέθοδο και με μεγάλη ακρίβεια την περίμετρο της Γης την οποία βρήκε ίση με 250 000 στάδια (περίπου 42 000 km, πολύ κοντά στην πραγματική που είναι 40 100 km). Γνωρίζοντας τη διάμετρο της Γης και το σχετικό μέγεθος της Σελήνης, οι αρχαίοι Έλληνες αστρονόμοι υπολόγισαν το μέγεθος της Σελήνης.

Ο σημαντικότερος των αστρονόμων της αρχαιότητας ήταν ο Ίππαρχος ο οποίος επινόησε το πρώτο και ακριβέστερο για την εποχή του γεωμετρικό σύστημα για την περιγραφή της κίνησης του Ήλιου και της Σελήνης με έκκεντρους κύκλους και επικύκλους<sup>1</sup>. Επιπλέον συνέταξε κατάλογο 850 αστέρων, τη θέση των οποίων προσδιόρισε με σύστημα ανάλογο του γεωγραφικού πλάτους και μήκους και τους κατέταξε ανάλογα με την λαμπρότητά τους σε μεγέθη. Κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων των αστέρων και συγκρίνοντας τα δεδομένα του με παλαιότερες παρατηρήσεις ανακάλυψε ότι η διεύθυνση του άξονα περιστροφής της ουράνιας σφαίρας μεταβάλλεται (φαινόμενο που ονομάζεται μετάπτωση). Υπολόγισε με ακρίβεια την απόσταση της Σελήνης και το μέγεθός της καθώς και τη διάρκεια του έτους με ακρίβεια 6 λεπτών της ώρας.

Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος (165-85 π.Χ.) ήταν ο τελευταίος από τους Έλληνες αστρονόμους και μαθηματικούς της εποχής του, ο οποίος βασιζόμενος στο έργο του πρώτου θεωρητικού αστρονόμου, του Απολλώνιου, πρότεινε το γεωκεντρικό σύστημα τροχιών και επικύκλων που επικράτησε για τα επόμενα 1 400 έτη (σχήμα 1.1). Στο γεωκεντρικό σύστημα η Γη θεωρείται ως το κέντρο του ηλιακού συστήματος. Η Σελήνη, οι πλανήτες, ο Ήλιος και οι αστέρες περιφέρονται γύρω από την ακίνητη Γη με ομαλή κυκλική κίνηση και συνιστούν τον ουρανό ο οποίος θεωρείται αιθέριος και αμετάβλητος.

Ο Πτολεμαίος επινόησε μοντέλα, παρατηρώντας τις κινήσεις του Ήλιου, της Σελήνης και των 5 γνωστών πλανητών (Ερμή, Αφροδίτης, Άρη, Δία και Κρόνου) στον ουρανό με μεγάλη ακρίβεια, προσπαθώντας να ερμηνεύσει τη φαινόμενη ανάδρομη κίνηση των πλανητών καθώς και τη διαφορετική τους λαμπρότητα κατά τη διάρκεια του έτους. Θεώρησε ότι το κάθε σώμα κινείται σε μία μικρή κυκλική τροχιά (έναν επίκυκλο) ο οποίος με τη σειρά του διέγραφε μία μία μεγαλύτερη κυκλική τροχιά (έκκεντρο) γύρω από την Γη (σχήμα 1.1). Αυτός ο συνδυασμός κινήσεων (όπως οι τροχοί στο εσωτερικό ενός ρολογιού) παρήγαγε μία τροχιά που έμοιαζε με την παρατηρούμενη μη κυκλική των πλανητικών τροχιών. Προς τιμή του έχει ονομαστεί ο φερόνυμος κρατήρας της Σελήνης και του Άρη. Ο Πτολεμαίος είχε συστηματοποιήσει όλη τη μαθηματική και αστρονομική γνώση της εποχής του (από τους Αλεξανδρινούς και Μεσαιωνικούς χρόνους, 2<sup>ος</sup> - 16<sup>ος</sup> μ.Χ. αιώνας) καθώς και τη δική του συμβολή σε ένα έργο 13 βιβλίων (159 π.Χ.), το οποίο μετρίοφρονα ονομάστηκε «Μαθηματική Σύνταξις» και αργότερα μεταφράστηκε από Άραβες σχο-

<sup>1</sup>Επίκυκλος ονομάζεται ένας κύκλος του οποίου το κέντρο κινείται έτσι ώστε να διαγράφει έναν μεγαλύτερο κύκλο που ονομάζεται έκκεντρος



Σχήμα 1.1: Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος (αριστερά, πηγή: [www.lessing-photo.com](http://www.lessing-photo.com)) είχε συγγράψει αρκετές πραγματείες, εκ των οποίων οι τρεις έπαιξαν σημαντικότερο ρόλο στην μεταγενέστερη ευρωπαϊκή επιστήμη. Η πρώτη από αυτές, η «Almagest» είχε αστρονομικό περιεχόμενο, η δεύτερη, η «Γεωγραφία» αφορούσε τη γεωγραφική γνώση του έως τότε γνωστού κόσμου και η τρίτη, η «Τετράβιβλος» εφάρμοζε την αστρολογία στην φιλοσοφία του Αριστοτέλη. Το σύστημα των επικύκλων που κατασεύασε προκειμένου να ερμηνεύσει τις πλανητικές τροχιές παρέμεινε στην επικαιρότητα για περισσότερα από 1 400 χρόνια.

λαστικιστές στα αραβικά και μετονομάστηκε σε «Almagest» («Μέγα Βιβλίο» ή «Η Μεγίστη Σύνταξη» ή «Μεγίστη»). Αυτή η εικόνα του γεωκεντρικού ηλιακού συστήματος ονομάστηκε «Πτολεμαϊκό Σύμπαν». Για τους επόμενους 14 αιώνες, οι μόνες αξιόλογες αστρονομικές παρατηρήσεις έγιναν από Κινέζους, Ινδούς και Άραβες οι οποίοι μελέτησαν τα αρχεία των Ελλήνων αστρονόμων, συνέταξαν μεγάλους καταλόγους αστέρων και ανέπτυξαν ακριβή ημερολόγια.

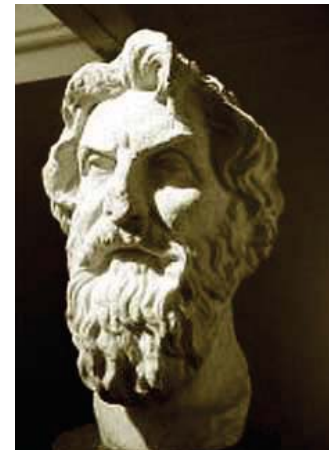
## 1.2 Η ηλιοκεντρική υπόθεση

Οι ιδέες του γεωκεντρικού συστήματος επανήλθαν στο Μεσαίωνα και υιοθετήθηκαν από φιλόσοφους-θεολόγους όπως ο Θωμάς Ακινάτης. Η ιδέα της Γης ως το κέντρο δημιουργίας μέσα σε μία σφαίρα που ταυτίστηκε με τον Χριστιανικό Ουρανό είχε ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του χριστιανικού δόγματος και η εικόνα του Σύμπαντος

δεν ήταν πλέον επιστημονικό ερώτημα.

Το 16<sup>ο</sup> αιώνα (μετά από σχεδόν 2000 έτη) μία νέα ιδέα προτάθηκε από τον Πολωνό ιερωμένο και αστρονόμο Nicolaus Copernicus (1473-1543) στο βιβλίο «De revolutionibus Orbitum Coelestium» («Περί περιφοράς των ουρανίων σωμάτων») που δημοσιεύτηκε μετά το θάνατό του, η οποία έφερε την επανάσταση και θεμελίωσε το ηλιοκεντρικό σύστημα με τον Ήλιο στο κέντρο του Σύμπαντος και τη Γη να περιφέρεται γύρω του (στην τρίτη κατά σειρά θέση από τον Ήλιο σε σχέση με τους άλλους πλανήτες).

Σε αυτό το σύστημα η Γη περιστρεφόταν γύρω από τον εαυτό της σε 24 ώρες, η Σελήνη γύρω από τη Γη και οι αστέρες ήταν ακίνητοι αλλά με φαινόμενη κίνηση εξαιτίας της γήινης περιστροφής. Αν και το ηλιοκεντρικό σύστημα του Κοπέρνικου εξήγησε αυτόματα τη μεταβαλλόμενη λαμπρότητα των πλανητών λόγω της μεταβαλλόμενης απόστασής τους από τη Γη αλλά και την ανάδρομή κίνησή τους με στοιχεία γεωμετρίας και με βάση την ιδέα της ταχύτερης κίνησης των πλανητών με τις μικρότερες τροχιές, διατήρησε την ιδέα της κυκλικής τροχιάς και των επικύκλων,



Σχήμα 1.2: Ο Αριστοτέλης (αριστερά, πηγή: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)) γεννήθηκε στη Χαλκιδική το 384 π.Χ. Ήταν φιλόσοφος, μαθητής του Πλάτωνα και δάσκαλος του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Ο Nicolaus Copernicus (κέντρο, πηγή: [www.crystalinks.com](http://www.crystalinks.com)) γεννήθηκε στην Πολωνία το 1473. Στην ουσία ήταν ο πρώτος αστρονόμος ο οποίος κατασκεύασε ένα επιστημονικά τεκμηριωμένο ηλιοκεντρικό σύστημα το οποίο εκθρόνισε τη Γη από το κέντρο του σύμπαντος. Ο Αρίσταρχος ο Σάμιος (δεξιά, πηγή: [www.russellcottrell.com](http://www.russellcottrell.com)) ήταν ο πρώτος που συνέλαβε την ιδέα του ηλιοκεντρικού συστήματος, τοποθετώντας τον Ήλιο στο κέντρο του σύμπαντος. Οι ιδέες του είχαν απορριφθεί για περισσότερα από 1 800 χρόνια, ώσπου τις αναβίωσε αρχικά ο Copernicus και στη συνέχεια ο Kepler και ο Νεύτωνας.

αν και χρησιμοποιήσε λιγότερους από το Πτολεμαϊκό.

Οι ιδέες του Κοπέρνικου παρέμειναν ασαφείς για τα επόμενα 100 έτη. Αλλά τον 17<sup>ο</sup> αιώνα το έργο των Kepler, Γαλιλαίο και Νεύτωνα θεμελίωσε το ηλιοκεντρικό Σύμπαν του Κοπέρνικου και έφερε την επανάσταση στην αστρονομία και στις φυσικές επιστήμες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ιδέα του ηλιοκεντρικού συστήματος δεν ήταν τόσο καινούργια. Ο πρώτος που διατύπωσε την ιδέα αυτή ήταν ο Αρίσταρχος ο Σάμιος, αλλά δεν κατάφερε να την θεμελιώσει λόγω της αριστοτέλειας επιρροής. Για την ριζοσπαστική του συμβολή όμως ο Αρίσταρχος αναφέρεται από πολλούς ως ο «Copernicus της αρχαιότητας».

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της σύγχρονης αστρονομίας του Κοπέρνικου έπαιξε η ακριβής καταγραφή των κινήσεων των σωμάτων στην ουράνια σφαίρα του Δανού Tycho Brahe (1546-1601) ο οποίος πριν την ανακάλυψη του τηλεσκοπίου επινόησε όργανα που του επέτρεψαν να πραγματοποιήσει μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας. Συγκεκριμένα

- Κάτέγραψε επακριβώς τις θέσεις του Άρη και τα δεδομένα του χρησιμοποιήθηκαν αργότερα από τον Kepler για τη διατύπωση των νόμων της κίνησης των πλανητών.
- Ανακάλυψε έναν υπερκαινοφανή αστέρα (ένα «υπερνέο» αστέρα) το 1572, αποδεικνύοντας ότι ήταν αστέρας του οποίου η λαμπρότητα μεταβλήθηκε σε 18 μήνες και όχι κάποιο τοπικό γεγονός.
- Μέτρησε με ακρίβεια την παράλλαξη του κομήτη του 1577 αποδεικνύοντας ότι είναι πιο μακρινό αντικείμενο από τη Σελήνη.
- Πραγματοποίησε τις ακριβέστερες μετρήσεις της παράλλαξης των αστέρων (μετρώντας μηδενική παράλλαξη) - αν και οδηγήθηκε σε λάθος συμπέρασμα.

Ο Tycho (με βάση τις μηδενικές παραλλάξεις των αστέρων) πρότεινε ένα ενδιάμεσο μοντέλο του Σύμπαντος μεταξύ του Πτολεμαϊκού και του Κοπερνίκειου όπου η Γη βρισκόταν στο κέντρο αλλά οι υπόλοιποι πλανήτες περιφερόταν γύρω από τον Ήλιο καθώς ο Ήλιος περιφερόταν γύρω από τη Γη.

### 1.2.1 Οι νόμοι του Kepler

Το Κοπερνίκειο σύστημα με τους 30 περίπου επίκυκλους κίνησης των πλανητών αντικατέστησαν οι τρεις νόμοι που διατύπωσε ο βοηθός του Brahe, ο Γερμανός Johannes Kepler (1571-1630) στην προσπάθειά του να ερμηνεύσει την κίνηση του Άρη. Οι νόμοι του Kepler όχι μόνο περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια μέχρι σήμερα τις κινήσεις των πλανητικών συστημάτων και των διπλών συστημάτων των αστέρων αλλά σηματοδότησαν και την έναρξη μιας νέας εποχής όπου η επιστήμη άρχισε να περιγράφει τη φύση με μαθηματική ακρίβεια.



Σχήμα 1.3: Το μνημείο των Tycho Brahe και Johannes Kepler στην Πράγα. Ο Brahe, γεννήθηκε στη Δανία το 1546 και έγινε ιδιαίτερα γνωστός για τις ακριβείς αστρονομικές παρατηρήσεις που πραγματοποίησε. Ο Kepler γεννήθηκε στη Γερμανία το 1571 και υπήρξε βοηθός του Brahe (πηγή: [www.w-volk.de](http://www.w-volk.de)).

### Ο πρώτος νόμος του Kepler

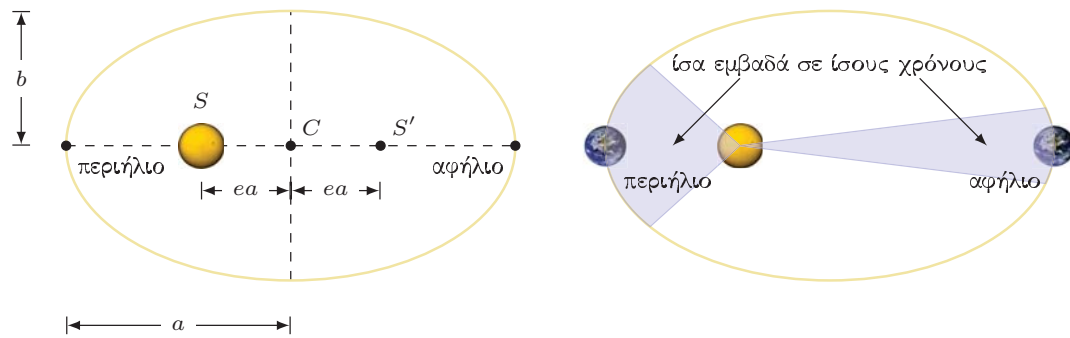
Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο η τροχιά κάθε πλανήτη είναι επίπεδη ελλειπτική με τον Ήλιο τοποθετημένο σε μία από τις εστίες της ελλείψεως ( $S, S'$ ) όπως φαίνεται στο σχήμα (1.4) όπου έχουν σημειωθεί ο μεγάλος ημιάξονας  $a$  και η απόσταση  $CS$  του κέντρου  $C$  από την εστία  $S$  που καταλαμβάνει ο Ήλιος. Την ελλειπτική τροχιά του πλανήτη χαρακτηρίζουν δύο παράμετροι: ο μεγάλος ημιάξονας  $a$  που καθορίζει το μέγεθος της τροχιάς και η εκκεντρότητα  $e$  που ορίζεται από τη σχέση

$$e = \frac{CS}{a}, \quad (1.1)$$

όπως καθορίζεται από το σχήμα (1.4). Η εκκεντρότητα είναι μικρότερη της μονάδας για ελλειπτικές τροχιές και καθορίζει το πόσο πεπλατυσμένη είναι μία έλλειψη ή αλλιώς το πόσο αποκλίνει από τον κύκλο (για τον οποίο είναι  $e = 0$ ). (Όταν ο Νεύτων ανακάλυψε το νόμο της βαρύτητας, οι ελλειπτικές τροχιές προέκυψαν ως μαθηματικό αποτέλεσμα του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης που ακολουθεί η βαρυτική δύναμη).

### Ο δεύτερος νόμος του Kepler

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο η επιβατική ακτίνα, η υποθετική δηλαδή ευθεία που συνδέει τον Ήλιο με τον εκάστοτε πλανήτη, διαγράφει κατά τη διάρκεια της κινή-



Σχήμα 1.4: Αριστερά: Οι ελλειπτικές τροχιές των πλανητών σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Kepler,  $e$  είναι η εκκεντρότητα,  $a$  ο μεγάλος και  $b$  ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης, με  $b^2 = a^2(1 - e^2)$ . Δεξιά: Σχηματική αναπαράσταση του δεύτερου νόμου του Kepler.

σεως του πλανήτη γύρω από τον Ήλιο ίσα εμβαδά σε ίσα χρονικά διαστήματα όπως φαίνεται στο σχήμα (1.4). Αυτός ο σταθερός ρυθμός με τον οποίο διαγράφεται η παραπάνω επιφάνεια είναι διαφορετικός για κάθε πλανήτη. Από τον δεύτερο νόμο προκύπτει ότι η ταχύτητα κάθε πλανήτη δεν είναι σταθερή σε κάθε σημείο της τροχιάς του και ελάχιστη στο περιήλιο, στο πιο κοντινό δηλαδή στον Ήλιο σημείο της τροχιάς του και ελάχιστη στο αφήλιο, στο πιο μακρινό. Η Γη βρίσκεται στο περιήλιο της τροχιάς της περίπου στις 2 Ιανουαρίου κάθε έτους (η σχεδόν σύμπτωση με την αρχή του ημερολογιακού έτους είναι τυχαία).

### Ο τρίτος νόμος του Kepler

Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο (ο οποίος δημοσιεύτηκε εννέα έτη μετά από τους άλλους δύο) τα τετράγωνα των περιόδων  $P$  περιφοράς των πλανητών γύρω από τον Ήλιο είναι ανάλογα των τρίτων δυνάμεων των μεγάλων ημιαξόνων  $a$  των τροχιών τους δηλαδή

$$\frac{P^2}{a^3} = \text{σταθερό.} \quad (1.2)$$

ή για δύο πλανήτες

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3. \quad (1.3)$$

Αυτό σημαίνει ότι όσο πιο μακριά είναι ένας πλανήτης από τον Ήλιο τόσο περισσότερο χρόνο κάνει για να ολοκληρώσει μία περιφορά στην τροχιά του. Για τη Γη έχουμε  $a = 1 AU$  (όπου  $AU$  είναι η αστρονομική μονάδα) και  $P = 1$  έτος, άρα η

σταθερά σε αυτές τις μονάδες είναι 1 οπότε ο 3<sup>ος</sup> νόμος εκφράζεται ως

$$(\text{περίοδος σε έτη})^2 = (\text{απόσταση σε } AU)^3, \quad (1.4)$$

απ' όπου μπορεί να υπολογιστεί η «ακτίνα» της τροχιάς ενός πλανήτη (ή ενός άλλου σώματος) ή η περίοδος περιστροφής του σε σχέση με τη γήινη.

### 1.2.2 Οι παρατηρήσεις του Galileo

O Galileo Galilei (1564 -1642) ήταν ο πρώτος που παρείχε σημαντικά στοιχεία που υποστήριζαν το ηλιοκεντρικό σύστημα. Με το πρωτόπορο του τηλεσκόπιο έκανε πολλές παρατηρήσεις και ανακάλυψε:

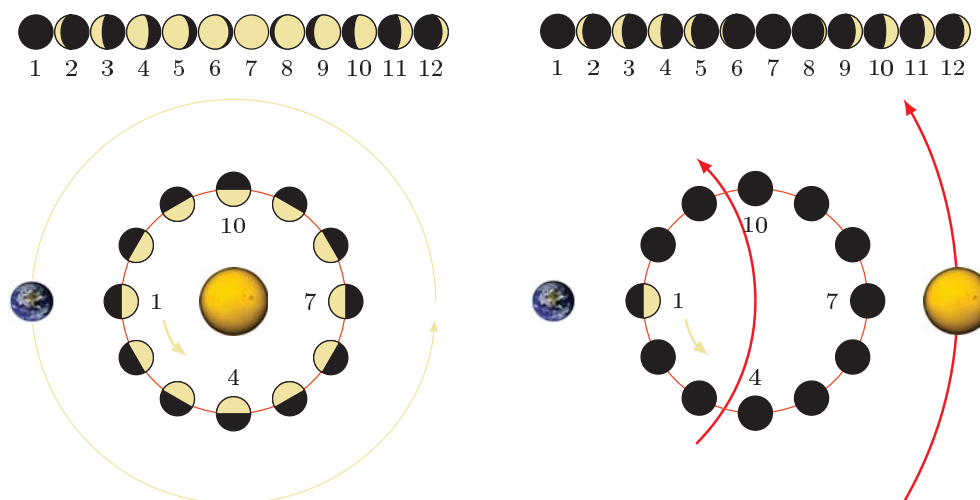
- Όρη και ηφαίστεια στη Σελήνη.
- Κινούμενες ηλιακές κηλίδες στον Ήλιο.
- Μεμονωμένους αστέρες μέσα στο Γαλαξία μας.
- Φάσεις της Αφροδίτης όπως αυτές της Σελήνης.
- 4 «φεγγάρια» του Δία (δορυφόροι του Γαλιλαίου).

Η παρατήρηση των φάσεων της Αφροδίτης ήταν και η πιο σημαντική απόδειξη υπέρ του ηλιοκεντρικού συστήματος.

Στο σχήμα (1.5), παριστάνεται η Αφροδίτη όπως θα φαινόταν στο ηλιοκεντρικό (αριστερά) και στο γεωκεντρικό σύστημα (δεξιά). Η γραμμοσκιασμένη πλευρά κάθε κύκλου (εικόνα της Αφροδίτης στις θέσεις 1-12) παριστάνει την προς τον Ήλιο πλευρά ενώ η πάνω σειρά παριστάνει την Αφροδίτη όπως φαίνεται από τη Γη για τις δώδεκα θέσεις της. Όπως φαίνεται στο γεωκεντρικό μοντέλο επειδή η Αφροδίτη κινείται πάνω σε επίκυκλο και βρίσκεται πάντα πλησιέστερα στη Γη απ' ότι στον Ήλιο (δεν περνά ποτέ πίσω από τον Ήλιο), δεν μπορεί ποτέ να φωτίζεται πλήρως κι άρα να παρατηρείται σε «πλήρη» φάση εκτός από ημικύκλιο, σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις.

Πέρα όμως από τις πολυάριθμες εφευρέσεις του, ο Galileo διατύπωσε τους πρώτους ακριβείς νόμους κίνησης των σωμάτων μετρώντας ότι όλα τα σώματα επιταχύνονται με τον ίδιο ρυθμό ανεξαρτήτως της μάζας τους, ανοίγοντας το δρόμο για τη μηχανική του Newton. Αναλυτικότερα διεύρυνε την έννοια της κίνησης εισάγοντας τον όρο της ταχύτητας μέσα από πειράματα με κεκλιμένα επίπεδα, εισήγαγε την ιδέα της δύναμης ως αίτιο της κίνησης καθώς και την έννοια της «αδράνειας» που έκανε τα σώματα να αντιστέκονται στην αλλαγή της κατάστασής τους. Για τις ριζοσπαστικές για την εποχή του ιδέες δικάστηκε από την Εκκλησία και περιορίστηκε σε κατ' οίκο φυλάκιση (1632) μέχρι το θάνατό του ενώ το έργο του «Dialogo dei Massimi Sistemi», («Διάλογος περί των δύο κύριων κοσμικών συστημάτων») μπήκε στη λίστα των απαγορευμένων έργων μαζί με το «De





Σχήμα 1.5: Οι φάσεις της Αφροδίτης στο ηλιοκεντρικό (αριστερά) και στο γεωκεντρικό σύστημα (δεξιά). Όπως φαίνεται, στο γεωκεντρικό σύστημα η Αφροδίτη δεν μπορεί να έχει φωτισμένο παρά ένα μόνο μέρος του δίσκου της. Το ποσοστό του δίσκου που φωτίζεται εξαρτάται από τις σχετικές θέσεις μεταξύ Γης, Αφροδίτης και Ήλιου και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να ξεπερνά το 50%.

Revolotionibus» του Copernicus και τη «Νέα Αστρονομία» του Kepler, όπου και παρέμειναν έως το 1835.

### 1.2.3 Οι νόμοι του Newton

Ενώ η Εκκλησία του 17<sup>ου</sup> αιώνα υποστήριζε το γεωκεντρικό Σύμπαν, οι περισσότεροι επιστήμονες ήταν υπέρμαχοι του ηλιοκεντρικού. Εν τούτοις οι νόμοι του Kepler αν και παρείχαν την πρώτη επιτυχή κινηματική περιγραφή των πλανητικών τροχιών ήταν εμπειρικοί και χρειαζόταν μία θεωρία για να τους ερμηνεύσει, να εξηγήσει δηλαδή ποια δύναμη κρατούσε τους πλανήτες στις καμπύλες τροχιές τους. Ο Isaac Newton (1642-1727) γεννήθηκε τη χρονιά που πέθανε ο Galileo και ασχολήθηκε με τη μηχανική και την οπτική αν και δεν δημοσίευσε πολλές από τις ανακαλύψεις του παρά μετά από τη δημοσίευση τους από άλλους επιστήμονες. Βασισμένος στο έργο του Galileo διατύπωσε το 1687 στο έργο του «Philosophiae Naturalis Principia Mathematica» γνωστό απλώς ως «Principia» τους τρεις θεμελιώδεις νόμους της μηχανικής που ερμηνεύουν και την πλανητική κίνηση.

1. Ένα σώμα θα συνεχίσει να κινείται σε ευθεία γραμμή με σταθερή ταχύτητα εκτός εάν ασκηθεί πάνω του μια εξωτερική μη μηδενική δύναμη (νόμος της αδράνειας).

2. Η δύναμη παράγει επιτάχυνση ( $\mathbf{a}$ ) με μέτρο που εξαρτάται από τη μάζα του σώματος σύμφωνα με τη σχέση

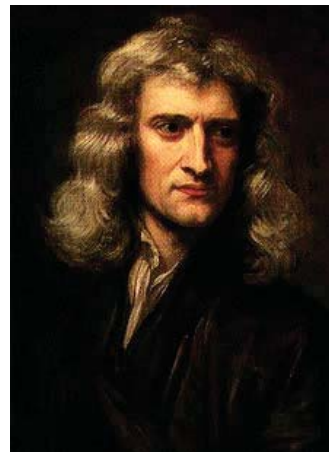
$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (1.5)$$

3. Εάν μία δύναμη ασκηθεί σε ένα σώμα τότε και το σώμα θα ασκήσει ίση και αντίθετη δύναμη στο αίτιο της δύναμης.

Παρατηρώντας ότι η δύναμη από τον Ήλιο είναι ίση και αντίθετη με αυτήν της Γης - Ηλίου απέδειξε ότι μόνο εάν η δύναμη ελαττώνεται καθώς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης αυξάνει, προκύπτουν οι ελλειπτικές τροχιές του Kepler.

Αν και ο Galileo ήταν ο πρώτος που παρατήρησε ότι τα σώματα «έλκονται» προς το κέντρο της Γης, ο Newton έδειξε ότι η ίδια δύναμη (βαρύτητα) ήταν υπεύθυνη για τις τροχιές των πλανητών στο ηλιακό σύστημα, διατυπώνοντας τον Παγκόσμιο νόμο της βαρύτητας σύμφωνα με τον οποίο όλα τα σώματα στο Σύμπαν και έλκονται μεταξύ τους με μια δύναμη ανάλογη των μαζών τους και κι αντιστρόφως ανάλογη

---



Σχήμα 1.6: Ο Galileo Galilei (αριστερά, πηγή: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)) γεννήθηκε το 1564 στην Ιταλία. Ένα από τα επιτεύγματά του ήταν η εφαρμογή και βελτιστοποίηση του τηλεσκοπίου με το οποίο πραγματοποίησε μία σειρά αστρονομικών παρατηρήσεων οι οποίες στήριζαν τις θεωρίες του Copernicus. Ο Isaac Newton (δεξιά, πηγή: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)) γεννήθηκε στην Αγγλία το 1643. Στις εργασίες του περιέγραψε την παγκόσμια βαρύτητα διατυπώνοντας τους γνωστούς νόμους της κίνησης θεμελιώνοντας στην ουσία την κλασική μηχανική, ενώ παράλληλα επιβεβαίωσε τις θεωρίες περί ηλιοκεντρικού συστήματος.

---

---

της απόστασής τους  $r$ , δηλαδή

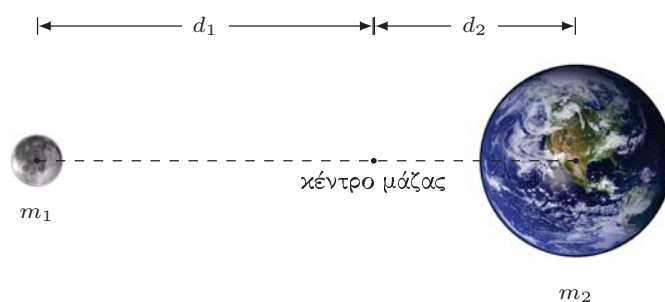
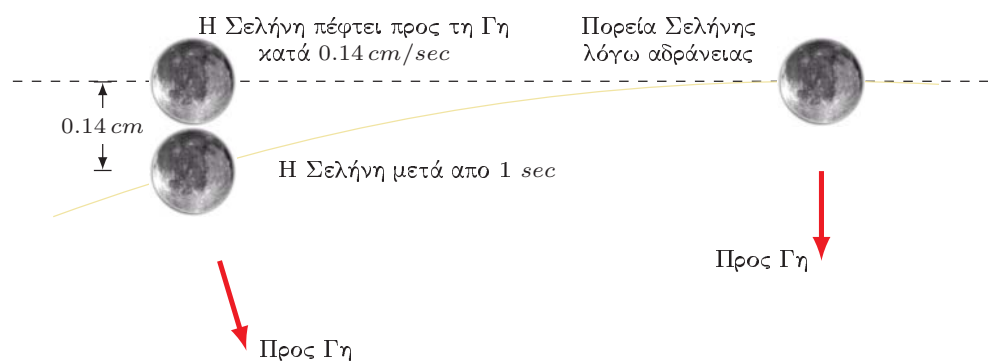
$$\mathbf{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \hat{r}, \quad (1.6)$$

όπου

$$G = 6.67 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}, \quad (1.7)$$

η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας.

Η δύναμη της βαρύτητας μεταξύ των πλανητών και του Ήλιου είναι αυτή που συγκρατεί τους πλανήτες στις τροχιές τους και κατευθύνεται προς το κέντρο της τροχιάς. Εάν η δύναμη της βαρύτητας είναι ελκτική πώς μια τροχιά διατηρείται σταθερή ή εύλογα γιατί η Σελήνη δεν πέφτει πάνω στη Γη ή η Γη στον Ήλιο; Η διατήρηση μιας τροχιάς είναι το αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ των αδρανειακών και των βαρυτικών δυνάμεων. Αυτό σημαίνει ότι η Σελήνη καθώς κινείται στην τροχιά της κάθε 1 sec «πέφτει» προς τη Γη κατά 0.14 cm λόγω της επιτάχυνσης



Σχήμα 1.7: Πάνω: Η τροχιά της Σελήνης λόγω της βαρύτητας της Γης και της αδράνειας. Κάτω: Ένα βαρυτικό σύστημα δύο σωμάτων (εδώ της Γης και της Σελήνης).

της βαρύτητας. Λόγω όμως της καμπυλότητας της Γης, το έδαφος της Γης κάτω από τη Σελήνη έχει «πέσει» κατά την ίδια απόσταση ( $0.14 \text{ cm/sec}$ ) κι άρα η Σελήνη παραμένει στην ίδια απόσταση από τη Γη δηλαδή στην τροχιά της όπως φαίνεται και στο σχήμα (1.7).

Στην επιφάνεια ενός πλανήτη ή ενός δορυφόρου η βαρυτική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα μάζας  $m$  αποτελεί και το βάρος του σώματος και προκύπτει ως συνέπεια του νόμου της βαρύτητας από το γινόμενο της μάζας του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας του  $g$ , η οποία δίνεται από τη σχέση

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad (1.8)$$

όπου  $R$  η ακτίνα και  $M$  η μάζα του πλανήτη ή του δορυφόρου, η οποία στην επιφάνεια της Γης έχει μετρηθεί ίση με  $9.81 \text{ m/sec}^2$ . Έτσι ένα σώμα μάζας  $m$  στην Γη και στη Σελήνη, θα έχει βάρος μικρότερο στη Σελήνη γιατί η επιτάχυνση της βαρύτητας εκεί είναι 6 φορές μικρότερη απ' ό τι στην επιφάνεια της Γης.

Επιπλέον ο Newton παρατήρησε ότι στο σύστημα Ήλιος - πλανήτη που απέχουν απόσταση  $d$ , ο πλανήτης δεν περιφέρεται γύρω από έναν στατικό Ήλιο ο οποίος βρισκόταν στην προνομιακή θέση του Kepler, αλλά και οι δύο περιφέρονται γύρω από ένα κοινό σημείο, το κέντρο μάζας του συστήματος το οποίο απέχει αποστάσεις  $d_1$  και  $d_2$  από τις μάζες  $m_1$  και  $m_2$  αντίστοιχα και για το οποίο ισχύει

$$m_1 d_1 + m_2 d_2 = (m_1 + m_2) d_{cm}. \quad (1.9)$$

Στο σύστημα του κέντρου μάζας η απόσταση  $d_{cm}$  είναι ίση με το μηδέν οπότε

$$m_1 \mathbf{d}_1 + m_2 \mathbf{d}_2 = 0. \quad (1.10)$$

και δεδομένου ότι τα διανύσματα  $\mathbf{d}_1$  και  $\mathbf{d}_2$  έχουν αντίθετες διευθύνσεις ως προς το κέντρο μάζας

$$m_1 d_1 - m_2 d_2 = 0, \quad (1.11)$$

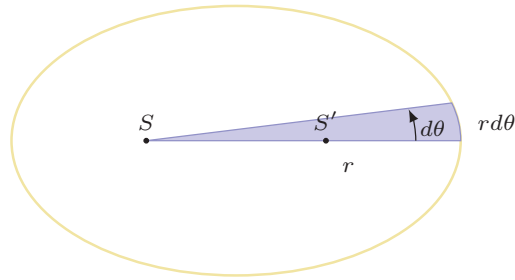
οπότε

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{d_2}{d_1}. \quad (1.12)$$

Δηλαδή οι αποστάσεις  $d_1$  και  $d_2$ , άρα και η συνολική απόσταση  $d = d_1 + d_2$  μεταβάλλονται αλλά ο λόγος τους παραμένει σταθερός. Άρα σύμφωνα με τον αναθεωρημένο πρώτο νόμο του Kepler:

Κάθε πλανήτη κινείται σε ελλειπτική τροχιά, με το κέντρο μάζας στη μία εστία της.

Ο δεύτερος νόμος του Kepler προκύπτει από την αρχή διατήρησης της στροφομής των δύο σωμάτων. Θεωρούμε ένα μικρό τμήμα της επιφάνειας της ελλειπτικής



Σχήμα 1.8: Μία συνήθης ελλειπτική τροχιά και ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται στοιχειώδες το εμβαδόν  $dA$  που αντιστοιχεί σε μία επίσης στοιχειώδη γωνία  $d\theta$ . Για μικρές γωνίες  $d\theta$  το γραμμοσκιασμένο τμήμα προσεγγίζει ορθογώνιο τρίγωνο με κάθετες πλευρές μήκους  $r$  και  $rd\theta$ .

τροχιάς  $dA$  που διαγράφει το σώμα σε χρόνο  $dt$ . Θα ισχύει ότι

$$dA = \frac{1}{2}r \cdot rd\theta. \quad (1.13)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της επιφάνειας είναι

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}r \cdot r \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2}ru_{\theta}, \quad (1.14)$$

όπου χρησιμοποιήσαμε την εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας

$$u_{\theta} = r \frac{d\theta}{dt}. \quad (1.15)$$

Εισάγοντας την στροφορμή

$$\mathbf{L} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{u}), \quad (1.16)$$

με μέτρο

$$L = mru_{\theta}, \quad (1.17)$$

ο ρυθμός μεταβολής της επιφάνειας  $dA$  γράφεται

$$\frac{dA}{dt} = \frac{L}{2m}. \quad (1.18)$$

Δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο ένα σώμα διαγράφει την επιφάνεια στην τροχιά του είναι ίσος με το ήμισυ της στροφορμής του διά της μάζας του (ειδική στροφορμή) ή η στροφορμή διατηρείται.

Εξετάζοντας την κυκλική κίνηση των δύο σωμάτων στο σύστημα του κέντρου μάζας, η δύναμη της βαρύτητας στο σώμα 2 ενεργεί ως κεντρομόλος και άρα

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} = \frac{m_2 u_2^2}{d_2}. \quad (1.19)$$

Όμως

$$u_2 = \frac{2\pi d_2}{P}, \quad (1.20)$$

οπότε

$$G \frac{m_1}{d^2} = \frac{4\pi^2 d_2}{P^2}. \quad (1.21)$$

Αλλά από τον ορισμό του κέντρου μάζας έχουμε

$$d_2 = \frac{m_1}{m_2} d_1 = \frac{m_1}{m_2} (d - d_2), \quad (1.22)$$

οπότε

$$d_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} d. \quad (1.23)$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει

$$G \frac{m_1}{d^2} = \frac{4\pi^2}{P^2} \frac{m_1}{m_1 + m_2} d, \quad (1.24)$$

Οπότε τελικά

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} d^3. \quad (1.25)$$

Η παραπάνω έκφραση αποτελεί και την αναθεωρημένη μορφή του τρίτου νόμου του Kepler.

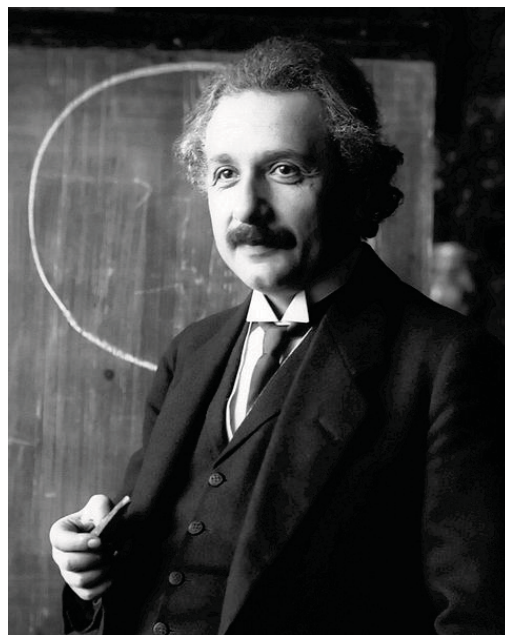
Στην περίπτωση που η μία μάζα είναι πολύ μεγαλύτερη από την άλλη (όπως στην περίπτωση Ήλιου και ενός πλανήτη), θα ισχύει ότι  $m_2 \gg m_1$  οπότε

$$d_2 = \frac{m_1}{m_2} d_1 \simeq 0 \quad \text{και συνεπώς} \quad d = d_1 + d_2 \simeq d_1, \quad (1.26)$$

και ο νόμος μεταπίπτει στην αρχική μορφή του. Αυτή είναι και η περίπτωση του ηλιακού συστήματος όπου το κέντρο μάζας συμπίπτει με το κέντρο του σώματος με τη μεγαλύτερη μάζα δηλαδή του Ήλιου. Γί αυτό και ο αρχικός νόμος του Kepler δίνει σωστά αποτελέσματα. Στην περίπτωση όμως που οι μάζες των δύο σωμάτων είναι περίπου ίσες, όπως συμβαίνει στα διπλά συστήματα αστέρων η αναθεώρηση του νόμου του Kepler είναι σημαντική και θα πρέπει να χρησιμοποιείται η τροποποιημένη μορφή του.

Η μαθηματική διατύπωση του δυναμικού μοντέλου του ηλιακού συστήματος του Newton θεμελίωσε την επιστήμη της ουράνιας μηχανικής. Το 1650-1700 με τη βελτίωση των τηλεσκοπίων προσδιορίστηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι θέσεις των πλανητών, το 1780 ο Herschel ανακάλυψε τυχαία τον πλανήτη Ουρανό επιβεβαιώνοντας την θεωρία της βαρύτητας ενώ το 1845 με βάση τις διαταραχές της κίνησης του Ουρανού προβλέφθηκε η θέση ενός νέου πλανήτη, του Ποσειδώνα, ανεξάρτητα από τους Adam και Leverrier. Φαινόμενα που οφείλονται στις βαρύτητα είναι οι παλίρροιες, η μετάπτωση του άξονα της Γης, τα σημεία Lagrange, η ύπαρξη των δακτυλίων του Κρόνου κ.α..

Η Νευτώνεια μηχανική παρέμεινε αδιαμφισβήτη μέχρι την εισαγωγή της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας (1905) από τον Albert Einstein (1879-1955) με την οποία έδειξε ότι οι τρεις νόμοι του Νεύτωνα είχαν ισχύ κάτω από ορισμένες συνθήκες - όταν οι ταχύτητες των σωμάτων δεν προσεγγίζουν την ταχύτητα του φωτός και αργότερα με τη διατύπωση της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας (1915) με την οποία έδειξε ότι ο νόμος της Παγκόσμιας Έλξης δεν ισχύει παρουσία ισχυρών βαρυτικών πεδίων.



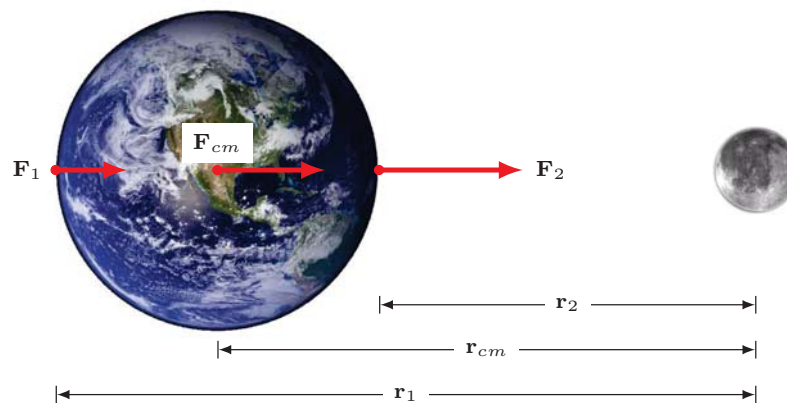
Σχήμα 1.9: Ο Albert Einstein γεννήθηκε το 1879 στη Γερμανία και ασχολήθηκε με τη θεωρητική Φυσική. Έγινε ιδιαίτερα γνωστός για τη Θεωρία της Σχετικότητας την οποία διατύπωσε και ιδιαίτερα για τη σχέση ισοδυναμίας μάζας - ενέργειας  $E = mc^2$ . Το 1921 τιμήθηκε με βραβείο Νόμπελ Φυσικής για την ανακάλυψη και περιγραφή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

### 1.3 Παλίρροιες

Μία από τις συνέπειες του νόμου της βαρύτητας είναι η δημιουργία παλίρροιών. Οι παλιρροϊκές δυνάμεις στη Γη λόγω της βαρυτικής έλξης της Σελήνης (ή του Ήλιου) είναι διαφορικές βαρυτικές δυνάμεις δηλαδή προέρχονται από τη διαφορά των βαρυτικών δυνάμεων που ασκούνται στα διάφορα σημεία της επιφάνειας της Γης σε σχέση με το κέντρο της, αυξανόμενης της απόστασης από τη Σελήνη (ή τον Ήλιο). Αυτές επηρεάζουν τη Γη πρώτον γιατί δεν είναι στερεή και ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειάς της καλύπτεται από νερό και δεύτερον γιατί είναι τόσο μεγάλες που ουσιαστικά την «παραμορφώνουν». Όπως φαίνεται στο σχήμα (1.10) οι βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα μάζας  $m$  που βρίσκεται σε αποστάσεις  $r_2 < r_{cm} < r_1$  από ένα σώμα μάζας  $M$  είναι  $F_2 > F_{cm} > F_1$  όπου

$$\mathbf{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \hat{r}. \quad (1.27)$$

και  $\hat{r}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που έχει φορά από το σώμα  $M$  προς το σώμα μάζας  $m$ . Η παλιρροϊκή δύναμη σε κάποιο σημείο της επιφάνειας της Γης υπολογίζεται από τη διανυσματική διαφορά της βαρυτικής έλξης την οποία ασκεί η Σελήνη σε μια στοιχειώδη μάζα  $m$  στο εν λόγω σημείο και της βαρυτικής έλξης που θα ασκούσε στην ίδια μάζα εάν αυτή βρισκόταν στο κέντρο της Γης.



Σχήμα 1.10: Οι παλιρροϊκές δυνάμεις που ασκούνται από ένα σώμα μάζας  $m$  σε ένα άλλο μάζας  $M$  που βρίσκεται σε απόσταση  $r_{cm}$ . Όπως φαίνεται, η δύναμη  $F_2$  που ασκείται από το σώμα μάζας  $m$  στην κοντινή πλευρά του σώματος μάζας  $M$ , είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη που ασκείται σε οποιοδήποτε άλλο σημείο, ενώ η  $F_1$  που ασκείται στο πιο απομακρυσμένο σημείο είναι η μικρότερη.



Μπορούμε να αποδείξουμε ότι σε κάθε σημείο η παλιρροϊκή δύναμη ισούται με

$$\mathbf{F}_{\text{παλ}} \simeq -G \frac{Mm}{r_{cm}^3} \left( \mathbf{R} - 3\mathbf{r}_{cm} \frac{\mathbf{r}_{cm} \cdot \mathbf{R}}{r_{cm}^2} \right). \quad (1.28)$$

Έτσι, για τα αντιδιαμετρικά σημεία στα δύο άκρα του ισημερινού οι δυνάμεις είναι ίσες και έχουν την ίδια φορά με το  $\mathbf{R}$  δηλαδή κάθετα προς το εξωτερικό μέρος της Γης και δίνονται από τη σχέση

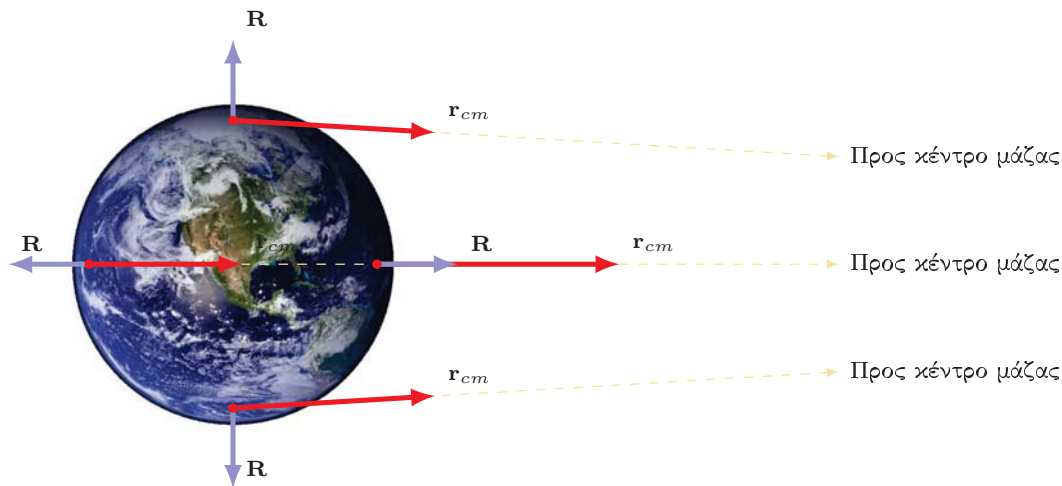
$$\mathbf{F}_{\text{παλ}} \simeq 2 \frac{Mm}{r_{cm}^3} \mathbf{R}, \quad (1.29)$$

ενώ στους πόλους όπου  $\mathbf{r}_{cm} \cdot \mathbf{R} \simeq 0$ , είναι ίσες και έχουν αντίθετη φορά με το  $\mathbf{R}$  και δίνονται από τη σχέση

$$\mathbf{F}_{\text{παλ}} \simeq -G \frac{Mm}{r_{cm}^3} \mathbf{R}. \quad (1.30)$$

Κατά συνέπεια είναι κάθετες προς την επιφάνεια της Γης και με φορά προς το προς το εσωτερικό της.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το μέτρο των παλιρροϊκών δυνάμεων είναι αντιστρόφως ανάλογο με τον κύβο της απόστασης μεταξύ των κέντρων μαζών των



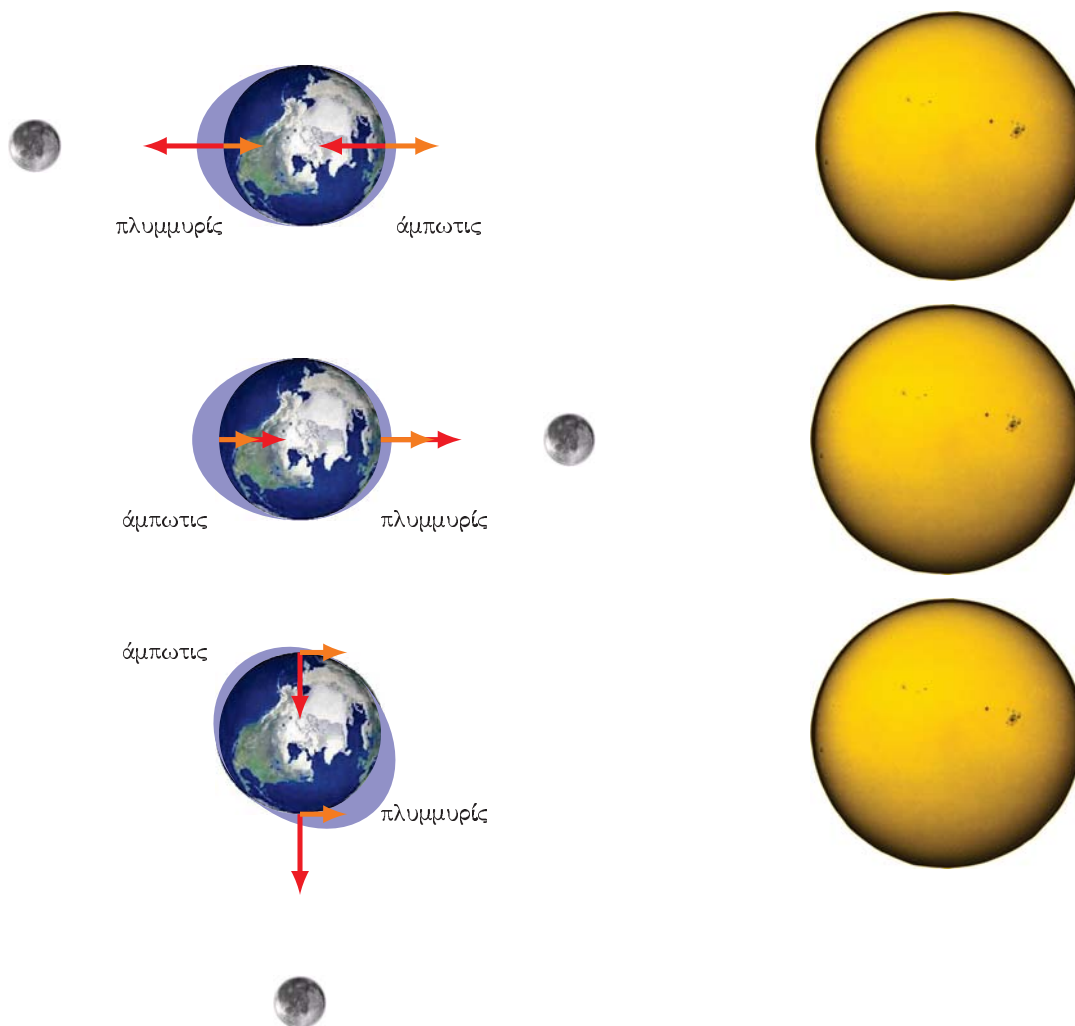
Σχήμα 1.11: Η γεωμετρία των διανυσμάτων  $\mathbf{R}$  και  $\mathbf{r}_{cm}$  των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα μάζας  $m$  σε ένα σημείο στην επιφάνεια της Γης λόγω της βαρυτικής έλξης που δέχεται τόσο από τη Γη όσο και από το κέντρο μάζας του συστήματος Γης - Σελήνης.

δύο σωμάτων  $M$  και  $m$ . Η διαφορά μεταξύ των παραπάνω επιταχύνσεων (βαρυτικών δυνάμεων ανά μονάδα μάζας) στο κέντρο και στα δύο άκρα του ισημερινού, σε συνδυασμό με την φυγόκεντρο και τη βαρυτική δύναμη σε κάποιο τυχαίο σημείο προκαλεί τη δημιουργία δύο προεξοχών στα δύο αντιδιαμετρικά σημεία των ωκεανών της Γης στον ισημερινό και την ροή του ύδατος από τα δύο ημισφαίρια προς τον ισημερινό. Καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της η στερεή επιφάνειά της περιστρέφεται κάτω από αυτές τις υδάτινες προεξοχές των ωκεανών. Κατ' αυτόν τον τρόπο πρακτικά για κάθε σημείο της επιφάνειας της Γης το οποίο είναι παραθαλάσσιο τα νερά ανυψώνονται (πλημμυρίζ) όταν το γήινο σημείο βρίσκεται προς τη διεύθυνση της Σελήνης, γεγονός το οποίο συμβαίνει κάθε 12 ώρες και κατεβαίνουν (άμπωτις) όταν το γήινο σημείο βρίσκεται σε διεύθυνση κάθετη με την πρώτη, επίσης κάθε 12 ώρες δηλαδή δημιουργούνται δύο παλίρροιες μέσα στο 24ωρο. Οι παλίρροιες αυτές ενισχύονται επιπλέον από τις παλιρροϊκές δυνάμεις του Ήλιου (40% των δυνάμεων της Σελήνης) κατά τη νέα Σελήνη και την Πανσέληνο (Γη - Ήλιος - Σελήνη στην ίδια ευθεία) και έχουν το μέγιστο ύψος ενώ όταν ο Ήλιος και Σελήνη σχηματίζουν ορθή γωνία (κατά το πρώτο και το τρίτο τέταρτο) οι παρατηρούμενες παλίρροιες έχουν το μικρότερο ύψος, όπως φαίνεται στο σχήμα (1.12).

Η παραπάνω ανάλυση αποτελεί φυσικά μία πρώτη προσεγγιστική ερμηνεία του φαινομένου και προκειμένου να προβλεφθεί η ακριβής ώρα και η διάρκεια της παλίρροιας σε έναν τόπο θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες που περιπλέκουν το πρόβλημα όπως η μορφολογία της γήινης επιφάνειας που αποτελεί εμπόδιο στη ροή των υδάτων, η τριβή μεταξύ των ωκεανών και των πυθμένων τους, η περιστροφή της Γης, το μεταβαλλόμενο βάθος των ωκεανών, οι άνεμοι κ.λ.π..

Επιπλέον η παλίρροια δεν επηρεάζει μόνο τη ροή των ωκεανών αλλά και το στερεό υλικό της Γης με αποτέλεσμα το σχήμα της να γίνεται ελλειψοειδές και στο σύνολό της να ανυψώνεται και να κατέρχεται κατά 300 mm δύο φορές την ημέρα. Αυτή η κίνηση γίνεται με απώλειες λόγω τριβής οι οποίες αναπληρώνονται από τη μηχανική ενέργεια του συστήματος Γη - Σελήνη. Πάντως επειδή οι ωκεανοί δεν ακολουθούν αυτόματα την περιστροφή της Γης, οι παλιρροϊκές προεξοχές δεν βρίσκονται στην ίδια ευθεία Γης - Σελήνης (όπως θα συνέβαινε αν η Γη ήταν ακίνητη) αλλά ο άξονας που τους ενώνει προηγείται της Σελήνης με αποτέλεσμα την δημιουργία ροπής που τείνει να επιβραδύνει την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της (γεγονός που ενισχύεται επιπρόσθετα και από τη δράση των παλιρροϊκών δυνάμεων του Ήλιου). όπως φαίνεται στο σχήμα (1.13). Αστρονομικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι η περίοδος περιστροφής της Γης (και άρα η διάρκεια της ημέρας) αυξάνει με ρυθμό 0.0015 δευτερόλεπτων ανά αιώνα (1 δευτερόλεπτο ανά 50 000 έτη) ενώ τα γεωλογικά δεδομένα (ρυθμός αυξήσεως κοραλλιών) μαρτυρούν ότι πριν από 400 εκατομμύρια έτη η συνολική διάρκεια ημέρας και νύχτας ήταν 22 ώρες.

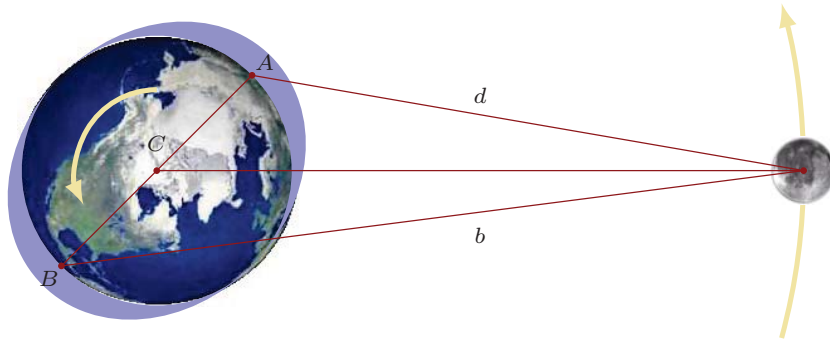
Αυτό σημαίνει ότι τα ρολόγια «τρέχουν» σε σχέση με τον μειούμενο ρυθμό περιστροφής της Γης και για να συγχρονιστούν απόλυτα η ατομική και η αστρονομική ώρα, προστίθεται 1 εμβόλιμο δευτερόλεπτο περίπου ανά 18 μήνες στη Συντονισμένη



Σχήμα 1.12: Οι παλίρροιες της Γης για τις διάφορες σχετικές θέσεις μεταξύ Γης, Σελήνης και Ήλιου. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η δύναμη που ασκεί η Σελήνη στην επιφάνεια της Γης ενώ με πορτοκαλί η αντίστοιχη του Ήλιου.

Παγκόσμια Ώρα, η οποία γενικά συμπίπτει με την Ώρα Greenwich (το τελευταίο εμβόλιμο δευτερόλεπτο προστέθηκε μόλις πριν από τα μεσάνυχτα της 31ης Δεκεμβρίου 2008).

Συνέπεια της απώλειας στροφορμής της Γης είναι η αύξηση της τροχιακής ταχύτητας της Σελήνης έτσι ώστε η ολική στροφορμή του κλειστού συστήματος Γης - Σελήνης να διατηρηθεί σταθερή (μεταφορά στροφορμής εκ περιστροφής σε στρο-



Σχήμα 1.13: Η απώλεια στροφορμής της Γης λόγω των παλιρροϊκών δυνάμεων της Σελήνης.

φορμή εκ περιφοράς). Άμεσο αποτέλεσμα μιας τέτοιας εξέλιξης είναι η περιφορά της Σελήνης γύρω από τη Γη σε ολοένα και πιο απομακρυσμένη τροχιά (κατά 3 περίπου μέτρα ανά αιώνα). Μακροπρόθεσμα η περιστροφή της Γης, η περιστροφή της Σελήνης και η τροχιακή περίοδος της Σελήνης αναμένεται να συγχρονιστούν όπως συνέβη στη περίπτωση του Πλούτων και του δορυφόρου του Χάροντα.

Όπως η Σελήνη προκαλεί την εμφάνιση παλιρροιών στη Γη, κατά τον ίδιο τρόπο και η Γη προκαλεί την εμφάνιση παλιρροιών στη Σελήνη με τη διαφορά ότι το μέγεθος των παλιρροϊκών δυνάμεων είναι πολύ μεγαλύτερο. Άρα και η ροπή που εξασκεί η Γη σε κάθε παλιρροϊκή προεξοχή που δεν βρίσκεται στην ευθεία Γη - Σελήνη θα είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα, όπως η περιστροφή της Γης επιβραδύνεται από τη δράση της Σελήνης έτσι και η περιστροφή της Σελήνης να έχει επιβραδυνθεί κατά το παρελθόν από τη ισχυρότερη παλιρροϊκή δράση της Γης. Τη στιγμή κατά την οποία η περίοδος περιστροφής της Σελήνης μειώθηκε τόσο ώστε να συμπέσει με την τροχιακή περιφορά της γύρω από τη Γη (έτσι ώστε η προεξοχή να βρίσκεται πάντα προς την Γη), δεν υπήρχε πλέον ροπή στρέψης και αποκαταστάθηκε μία σταθερή κατάσταση που έχει ως αποτέλεσμα η Σελήνη να παρουσιάζει πάντα την ίδια πλευρά της (με μικρές αποκλίσεις) προς τη Γη. Το φαινόμενο αυτό του συγχρονισμού είναι γνωστό ως «παλιρροϊκό» κλείδωμα και παρατηρείται στους περισσότερους δορυφόρους του Ηλιακού συστήματος σε σχέση με τους πλανήτες γύρω από τους οποίους περιφέρονται.

Το φαινόμενο όμως των παλιρροιών επηρεάζει όλα τα αστρονομικά σώματα. Η μεταβολή της συνολικής βαρυτικής δύναμης στο κοντινότερο δορυφόρο του Δία την Ιώ κατά την περιφορά της έχει σαν αποτέλεσμα τη θέρμανση του δορυφόρου. Οι παλιρροϊκές δυνάμεις μεταξύ των στενών διπλών συστημάτων μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές διαταραχές της τροχιάς τους ενώ κοντά σε μία μελανή οπή μπορεί να προκαλέσουν απόσπαση του προσπίπτοντος υλικού. Η παλιρροϊκή δύναμη στο

σύστημα ενός μικρού λευκού νάνου και ενός ερυθρού γίγαντα προκαλεί την απόσπαση ύλης από τον τελευταίο και την συσσώρευσή της σε δίσκο γύρω από τον λευκό νάνο, όπως διαπιστώνεται από την ανάλυση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

## 1.4 Τα σημεία Lagrange

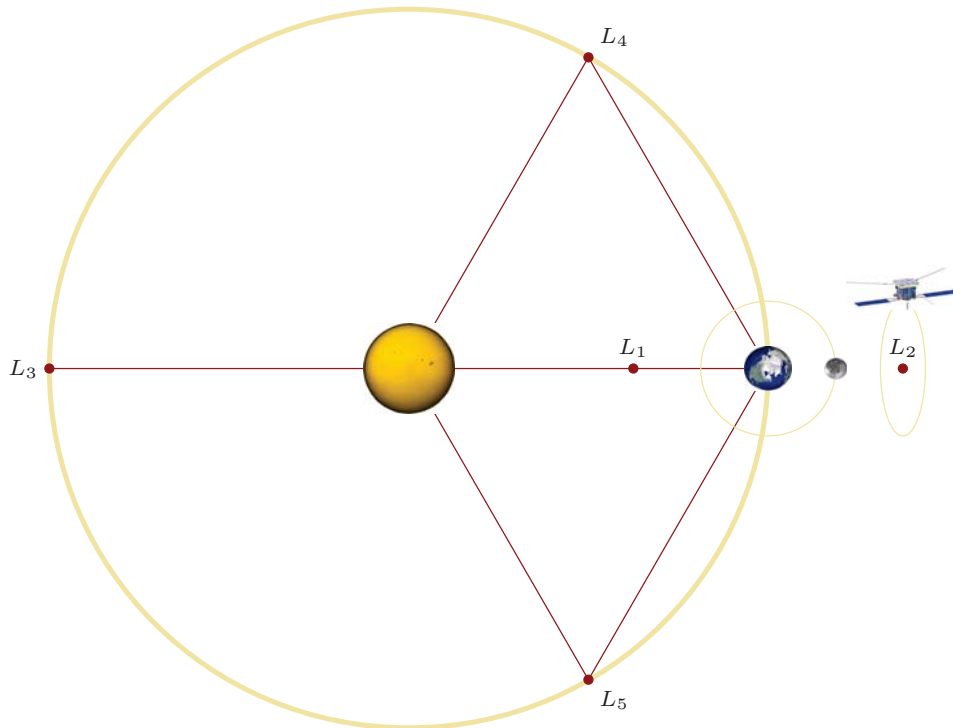
Γνωρίζουμε ότι αν δύο σφαιρικά συμμετρικά σώματα με μάζες  $M_1$  και  $M_2$  παραμένουν σταθερά ως προς ένα αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων τότε ένα σωματίδιο αμελητέας μάζας κάτω από την βαρυτική τους επίδραση ισορροπεί μόνο σε ένα σημείο που βρίσκεται στην ευθεία που ενώνει τα κέντρα μάζας τους και απέχει από το καθένα απόσταση  $r_1$  και  $r_2$  έτσι ώστε

$$\frac{M_1}{r_1^2} = \frac{M_2}{r_2^2}. \quad (1.31)$$

Το πρόβλημα όμως του προσδιορισμού της κίνησης ενός σώματος κάτω από τη βαρυτική επίδραση άλλων σωμάτων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (βαρυτικά) είναι αρκετά πολύπλοκο με την έννοια ότι δεν υπάρχει μία εξίσωση που να περιγράφει την κίνησή του κάθε χρονική στιγμή. Τέτοιες αλγεβρικές εξισώσεις υπάρχουν μόνο σε ειδικές περιπτώσεις όπου τα σώματα έχουν έναν ειδικό (και σπάνιο) σχηματισμό. Τέτοια ειδική περίπτωση αποτελεί η κίνηση ενός μικρού σωματιδίου (αμελητέας μάζας) στο βαρυτικό πεδίο δύο σωμάτων που περιφέρονται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας σε κυκλικές τροχιές, την οποία πρώτος μελέτησε ο Γάλλος μαθηματικός και αστρονόμος Joseph-Louis Lagrange (1736-1813). Τέτοια συστήματα είναι ο Ήλιος - Γη, ο Ήλιος - Δίας, η Γη - Σελήνη.

Σε ένα σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  ίση με τη γωνιακή ταχύτητα περιφοράς των δύο αστέρων σε κυκλική τροχιά γύρω από το κοινό κέντρο μάζας θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τη συνολική δύναμη που ασκείται σε κάθε σημείο όχι μόνο λόγω του βαρυτικού πεδίου της κάθε μάζας αλλά και λόγω της περιστροφικής κίνησης του συστήματος αναφοράς. Κοντά στο κέντρο της κάθε μάζας περισσότερο ισχυρή είναι η επίδραση της ελκτικής δύναμης της βαρύτητάς της παρά η βαρυτική επίδραση της άλλης μάζας και η περιστροφή του συστήματος, με αποτέλεσμα η συνολική δύναμη που ασκείται να έχει διεύθυνση προς το κέντρο του. Στο ισημερινό επίπεδο μακριά από τις δύο μάζες η συνολική δύναμη που εξασκείται σε ένα σωματίδιο κυριαρχείται από την επίδραση της περιστροφής δηλαδή από την προς τα έξω «φυγόκεντρη δύναμη».

Η λύση του παραπάνω προβλήματος οδηγεί στον εντοπισμό 5 σημείων  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  και  $L_5$  (σημεία Lagrange) στο επίπεδο της αμοιβαίας κυκλικής περιφοράς των δύο σωμάτων περί το κοινό κέντρο μάζας, στα οποία η συνολική δύναμη που ασκείται είναι μηδέν (ή η συνολική δυναμική ενέργεια είναι μηδέν). Αυτό σημαίνει ότι η τοποθέτηση του σωματιδίου σε ένα από αυτά τα σημεία θα έχει ως συνέπεια



Σχήμα 1.14: Τα σημεία Lagrange για το σύστημα Γης - Ήλιου.

να κινηθεί σε κυκλική τροχιά διατηρώντας τον ίδιο πάντα προσανατολισμό σε σχέση με τα δύο μεγαλύτερα σώματα. Από τα σημεία αυτά τα τρία πρώτα  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  βρίσκονται πάνω στην ευθεία που συνδέει τις δύο μάζες και είναι ασταθή με την έννοια ότι αν το σωματίδιο βρεθεί σε ένα από αυτά και υποστεί μία μικρή διαταραχή θα αναγκαστεί να εγκαταλείψει την κυκλική τροχιά του ενώ τα άλλα  $L_4$ ,  $L_5$  σχηματίζουν (το καθένα) ισόπλευρα τρίγωνα με τα σημεία όπου βρίσκονται οι μάζες  $M_1$ ,  $M_2$  και είναι ευσταθή (αν το σωματίδιο βρεθεί σε ένα από αυτά ακόμη και αν υποστεί μία μικρή διαταραχή θα επανέλθει πάλι σε αυτό το σημείο ισορροπίας).

Τέτοιες μικρές διαταραχές συμβαίνουν πολύ συχνά λόγω των ασθενών βαρυτικών επιδράσεων των άλλων σωμάτων και γι αυτό τέτοιοι ειδικοί σχηματισμοί τριών σωμάτων είναι σπάνιοι. Το πιο γνωστό φυσικό παράδειγμα ενός τέτοιου σχηματισμού τριών σωμάτων αποτελεί ο Ήλιος, ο Δίας και οι Τρωικοί αστεροειδείς (ο Ήλιος και ο Δίας κινούνται σχεδόν σε κυκλικές αμοιβαίες τροχιές και οι αστεροειδείς έχουν αμελητέα μάζα σε σχέση με αυτούς) που παρατηρούνται σε εκείνα τα σημεία της τροχιάς του Δία τα οποία μαζί με τον Ήλιο και το Δία σχηματίζουν ισόπλευρα τρίγωνα.

Στο βαρυτικό σύστημα Ηλίου - Γης τα αντίστοιχα σημεία φαίνονται στο σχήμα

(1.14). Από αυτά εάν τοποθετηθεί ένα σώμα στα ευσταθή σημεία θα παραμένει σε σταθερή απόσταση από τη Γη και τον Ήλιο, καθώς η Γη περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο. Τα σημεία  $L_1$ ,  $L_2$  αν και ασταθή (σε χρονική κλίμακα 23 ημερών χρειάζονται διόρθωση τροχιάς) επιτρέπουν την περιφορά ενός σώματος κι επειδή είναι απαλλαγμένα από μεσοπλανητική σκόνη χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση διαστημικών ανιχνευτών όπως το SOHO που περιφέρεται γύρω από το  $L_1$ , σε απόσταση 1  $AU$  από τη Γη, μόνιμως προς την κατεύθυνση του Ήλιου και καταγράφει όλα τα χαρακτηριστικά του και το ACE που καταγράφει τη σύνθεση του ηλιακού ανέμου. Πίσω από τη Γη και γύρω από το  $L_2$ , «κοιτώντας» μακριά από τη Γη περιφέρεται ο ανιχνευτής μικροκυματικής ακτινοβολίας WMAP, ο ανιχνευτής υπέρυθρης ακτινοβολίας Herschel Space Observatory της ESA και πιθανόν το μελλοντικό διαστημικό τηλεσκόπιο James Webb.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

# Ουράνιες κινήσεις

---

### 2.1 Οι αστερισμοί

Στη μια μεριά φτιάχνει τη γη, τον ουρανό στην άλλη,  
αλλού τη θάλασσα και τον ακούραστο ήλιο και τη σελήνη ολόγεμη.

Σ' άλλη μεριά τα ζώδια όλα φτιάχνει,  
τ' άστρα που στεφανώνουν τον ουρανό.

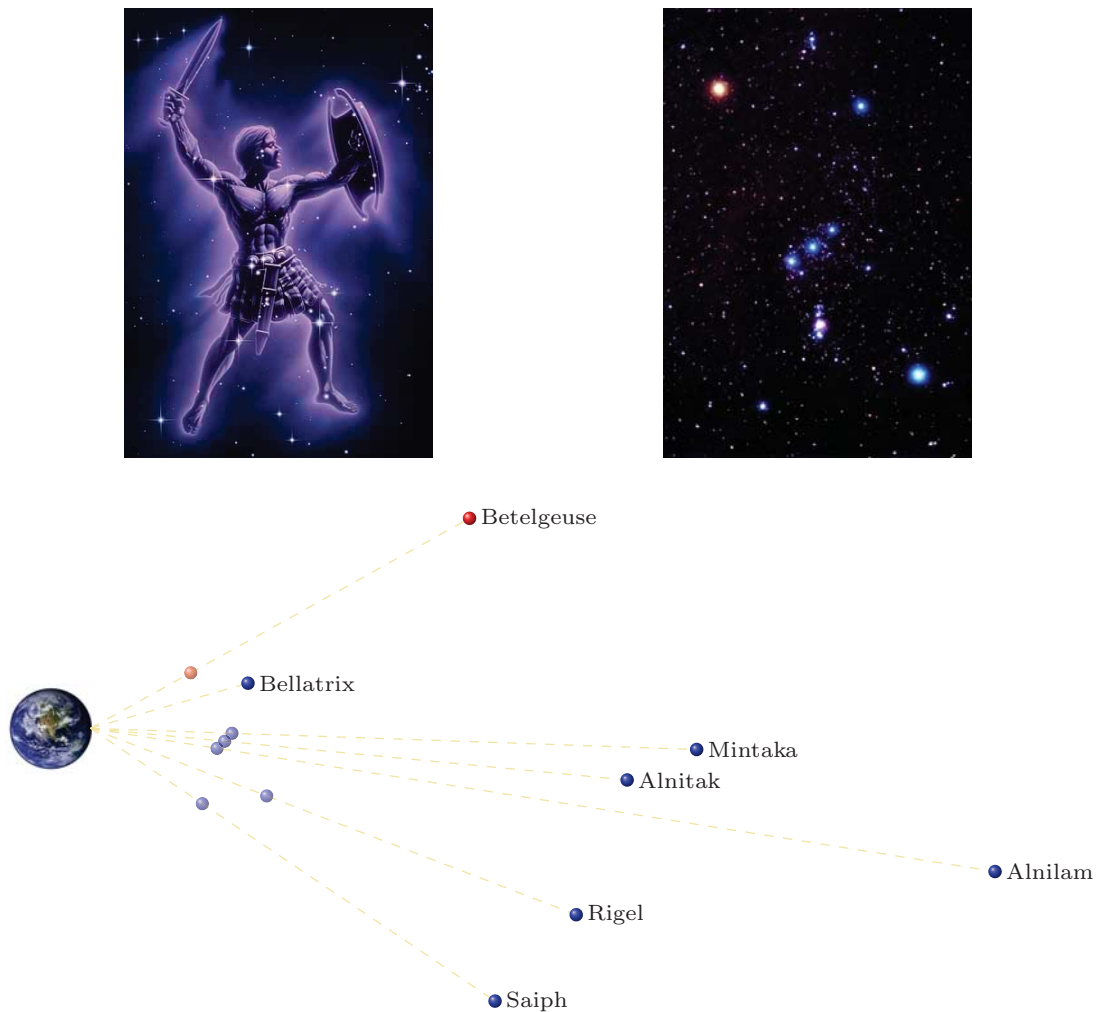
Τις Πλειάδες και τις Υάδες και τον δυνατό Ωρίωνα  
και την Άρκτο, που άμαξα μερικοί την ονομάζουν.

γιατί γύρω από τον εαυτό της περιστρέφεται και τον Ωρίωνα παραφυλάει  
και μόνο αυτή μες στα νερά του Ωκεανού δεν λούζεται.

(Ιλιάδα, ραψωδία Σ)

Ο νυχτερινός ουρανός όπως φαίνεται από τη Γη αποτελείται από σχηματισμούς αστέρων που προκύπτουν από τη σύνδεση των λαμπρότερων αστέρων με φανταστικές γραμμές και ορίζουν τους αστερισμούς. Αστερισμός είναι το φαινόμενο σχέδιο λαμπρών αστέρων στον ουρανό, που θύμιζε ιστορικά τη μορφή ενός ζώου, ανθρώπου, μυθολογικού προσώπου ή αντικειμένου, όπως για παράδειγμα Ωρίωνας ο κυνηγός, η Μεγάλη Άρκτος, Ζυγός κ.λ.π. (σε διαφορετικές εποχές και διαφορετικούς πολιτισμούς οι αστερισμοί είχαν διαφορετικά ονόματα).

Στην πραγματικότητα η εικόνα των αστερισμών ως δισδιάστατων παραστάσεων στον ουρανό είναι πλασματική γιατί οι αστέρες που απαρτίζουν έναν αστερισμό βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις και δεν αποτελούν πραγματική ομάδα στον τρισδιάστατο χώρο κι άρα μόνο στον ανθρώπινο οφθαλμό σχηματίζουν τις υποτιθέμενες παραστάσεις ως αποτέλεσμα προοπτικής όπως φαίνεται για τον Ωρίωνα (σχήμα 2.1). Αυτό σημαίνει ότι από ένα άλλο σημείο του Γαλαξία το σχέδιο ενός αστερισμού θα ήταν διαφορετικό.



Σχήμα 2.1: Πάνω αριστερά: Ο αστερισμός του Ωρίωνα ως μυθικού κυνηγού (πηγή: [www.joetucciarone.com](http://www.joetucciarone.com)). Πάνω δεξιά: Ο αστερισμός του Ωρίωνα στον νυχτερινό ουρανό (πηγή: [scienceblogs.com](http://scienceblogs.com)). Κάτω: Οι θέσεις στο χώρο των 7 κύριων αστέρων του αστερισμού του Ωρίωνα με τον Bellatrix, τον κοντινότερο από τους αστέρες να βρίσκεται στην πραγματική του θέση.

Αν και λόγω των μακρινών αποστάσεων των αστέρων ακόμα και η μικρότερη ίδια κίνησή τους δεν μεταβάλλει το σχήμα του αστερισμού σε χρονική κλίμακα του μέσου ανθρώπινου χρόνου ζωής (<100 έτη), μακροπρόθεσμα το σχήμα τους μεταβάλλεται όπως θα συμβεί μετά από 100 000 έτη με την Μεγάλη Άρκτο (σχήμα 2.22).

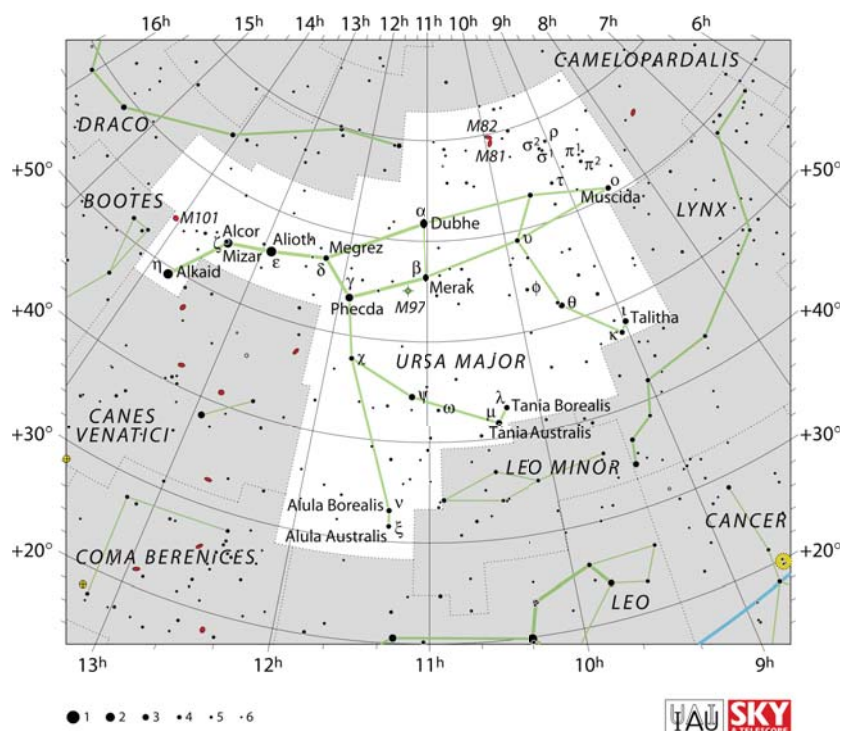
Οι αρχαιότεροι αστερισμοί είχαν αναγνωρισθεί από τους λαούς της Μεσοποταμίας

(4000 π.Χ.) όπως για παράδειγμα ο Σκορπιός, ο Λέων όπως φαίνεται από τα χαραγμένα λίθινα μνημεία ενώ κατά την αρχαιότητα οι Έλληνες πρόσθεσαν πλούσια μυθολογικά στοιχεία (για παράδειγμα Ηρακλής, Περσεύς, Ανδρομέδα). Ο Όμηρος στην Ιλιάδα αναφέρει ότι στην ασπίδα την οποία παρέδωσε ο Ήφαιστος στον Αχιλλέα είχε απεικονίσει τις Πλειάδες, τις Τάδες, τον Ωρίωνα και τη Μεγάλη Άρκτο την οποία ονομάζει και Άμαξα (βλ. εισαγωγή). Ο Ησίοδος στο «Έργα και Ημέραι» αναφέρει πολλούς από τους γνωστούς αστερισμούς. Ο Άρατος (270 π.Χ.) στο επικό του ποίημα «Τα φαινόμενα» περιγράφει τους αστερισμούς ως μνημονικό κανόνα βοήθειας προς τους ναυτικούς. Ο Ίππαρχος κατέγραψε τους 48 ορατούς αστερισμούς από τον ελληνικό χώρο και αργότερα ο Πτολεμαίος στην «Μεγίστη» τις θέσεις των 1022 αστέρων των 48 αστερισμών σε κατάλογο που χρησιμοποιήθηκε για τα επόμενα 1400 έτη. Οι Ρωμαίοι υιοθέτησαν τους ελληνικούς μύθους και έδωσαν πολλά λατινικά ονόματα στους αστερισμούς ενώ πολλά σύγχρονα ονόματα αστέρων έχουν αραβική ρίζα Algol (Αλγκόλ: «κεφάλι του Γκουλ», δαίμονα της αραβικής μυθολογίας), Antares (Αντάρης: «Σαν τον Άρη» λόγω του ερυθρωπού του χρώματος σαν τον πλανήτη), Betelgeuse (Μπέντελγκεζ: «ώμος του Ωρίωνα»). Το 1600 προστέθηκαν και άλλοι αστερισμοί για να καλύψουν τις μη ορατές από τους αρχαίους Έλληνες περιοχές όπως για παράδειγμα Τηλεσκόπιο, Πυξίδα και το 1930 η Διεθνής Αστρονομική Ένωση έθεσε τα όρια των 88 επίσημων αστερισμών έτσι ώστε κάθε τμήμα του ουρανού να ανήκει σε κάποιο αστερισμό και προσδιόρισε τον τρόπο αναγραφής τους (με τα τρία πρώτα λατινικά γράμματα). Για παράδειγμα η Μεγάλη Άρκτος λατινικά ονομάζεται Ursa Major, και η συντομογραφία της είναι UMa. Οι περισσότεροι από τους αστερισμούς του Βόρειου Ημισφαιρίου φέρουν τα ονόματα τους από την αρχαιοελληνική εποχή ενώ του Νότιου Ημισφαιρίου από τους θαλασσοπόρους που πρώτοι τους χαρτογράφησαν.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το τμήμα του ουρανού που ορίζεται στην Αστρονομία ως αστερισμός (constellation) της Μεγάλης Άρκτου (Ursa Major), και είναι ο τρίτος μεγαλύτερος σε «έκταση» πάνω στην ουράνια σφαίρα από όλους τους σύγχρονους αστερισμούς, δεν ταυτίζεται με την ομάδα των σχετικώς φωτεινών αστέρων (asterism) που σχηματίζουν το γνώριμο σχήμα της «κουτάλας» (Big Dipper)<sup>1</sup> που αποτελεί υποσύνολο του πρώτου - αν και καταχρηστικά χρησιμοποιείται (σχήμα 2.2, διακεκομμένη γραμμή). Το ίδιο συμβαίνει και στους άλλους αστερισμούς.

Οι γνωστοί αστερισμοί που βρίσκονται κατά μήκος της εκλειπτικής και τους οποίους διατρέχει ο Ήλιος κατά τη φαινόμενη πορεία του αποτελούν τον ζωδιακό κύκλο (κύκλο των ζώων). Οι ζωδιακοί αστερισμοί είναι σύμφωνα με την κλασική αστρονομία 12 - ένας για κάθε μήνα, ενώ σύμφωνα με τον αυστηρό ορισμό των

<sup>1</sup> Παρότι ο αστερισμός είχε πολλές ονομασίες και μυθικές συσχετίσεις, σχεδόν παντού ήταν μια θηλυκή αρκούδα (άρκτος). Οι Γερμανοί πάντως, και από αυτούς οι Αγγλοσάξονες, τον ονόμαζαν αμάξι. Συχνή επίσης αγγλική λαϊκή ονομασία για την Μεγάλη Άρκτο (πάντα το τμήμα της «κατσαρόλας») είναι «το Αλέτρι» (the Plough)



Σχήμα 2.2: Ο αστερισμός της Μεγάλης Άρκτου και ο σχηματισμός αστέρων με το όνομα Big Dipper Πηγή: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).

αστερισμών 13 (αστερισμός του Οφιούχου και πιθανόν του Κήτους, σχήμα 2.15).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά το παρελθόν ο χωρισμός των αστέρων σε αστερισμούς έγινε, για να διευκολυνθεί η μελέτη των ουράνιων σωμάτων, για να προσδιοριστεί το χρονικό διάστημα της νύχτας, των ωρών του έτους και για να περιγραφεί η όψη του ουρανού. Σήμερα με την ακριβή μέτρηση των αποστάσεων, οι αστερισμοί χρησιμοποιούνται για ιστορικούς λόγους για την περιγραφή της θέσης διαφόρων σωμάτων. Μερικές φορές όμως χρησιμοποιούνται και για τον έλεγχο της σωστής κατεύθυνσης των διαστημικών οχημάτων (οι αστροναύτες του Apollo γνώριζαν τη χρήση τους στην περίπτωση βλάβης των οργάνων). Ένα από τα σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα προσανατολισμού των διαστημικών οχημάτων αποτελεί η Αδρανειακή Αστρική Πυξίδα (Inertial Stellar Compass, ISC)<sup>2</sup> η οποία αποτελείται από μία κάμερα που καταγράφει τους σχηματισμούς των αστερισμών στο πεδίο οράσεως του (αστρικός ιχνηλάτης) και τη συγκρίνει με την αντίστοιχη στους αστρικούς χάρτες ώστε να καθορίζει την πορεία του οχήματος κι ένα γυροσκόπιο

<sup>2</sup>που φέρει ο δορυφόρος TacSat-2 ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 16/12/ 2006

που ελέγχει τη σταθερότητα της πορείας του με βάση τα δεδομένα της κάμερας ανά μερικά δευτερόλεπτα.

### 2.1.1 Η ονομασία των αστέρων

Οι λαμπρότεροι αστέρες φέρουν τα παραδοσιακά τους ονόματα ως μείγμα Ελληνικών, Αραβικών και Λατινικών ονομάτων. Συνήθως οι λαμπρότεροι του 14<sup>ου</sup> μεγέθους αστέρες καταγράφονται σε καταλόγους ενώ η πλειοψηφία (αμυδρότεροι αστέρες) δεν περιλαμβάνονται. Το 1603 ο Johann Bayer στον άτλαντα Ουρανομετρία (*Uranometria*) κατέγραψε 1600 αστέρες προσδιορίζοντας τους λαμπρότερους αστέρες ενός αστερισμού με γράμματα του ελληνικού αλφαβήτου: ο λαμπρότερος με  $\alpha$ , ο αμέσος λαμπρότερος με  $\beta$ , κ.ο.κ.. Σε μερικές περιπτώσεις όμως λόγω λαθών ή εγγενών μεταβολών λαμπρότητας η σειρά δεν ισχύει. Για παράδειγμα ο  $\alpha$  του Ωρίωνα (*Betelgeuse*) είναι αμυδρότερος από τον  $\beta$  του Ωρίωνα (*Rigel*). Ο Flamsteed (1712) αρίθμησε τους λαμπρούς αστέρες κάθε αστερισμού με σειρά αυξανόμενης ορθής αναφοράς (*RA*). Για παράδειγμα ο *Betelgeuse* είναι ο 58 Ori. Οι σύγχρονοι κατάλογοι περιέχουν περίπου 108 αστέρες (δηλαδή ένα πολύ μικρό τμήμα των αστέρων του γαλαξία μας). Οι λαμπροί αστέρες αναφέρονται με διαφορετικά ονόματα ανάλογα με τον κατάλογο. Για παράδειγμα ο λαμπρότερος ορατός στον ουρανό αστέρας βρίσκεται στον αστερισμό του Μεγάλου Κυνός και αναφέρεται ως:

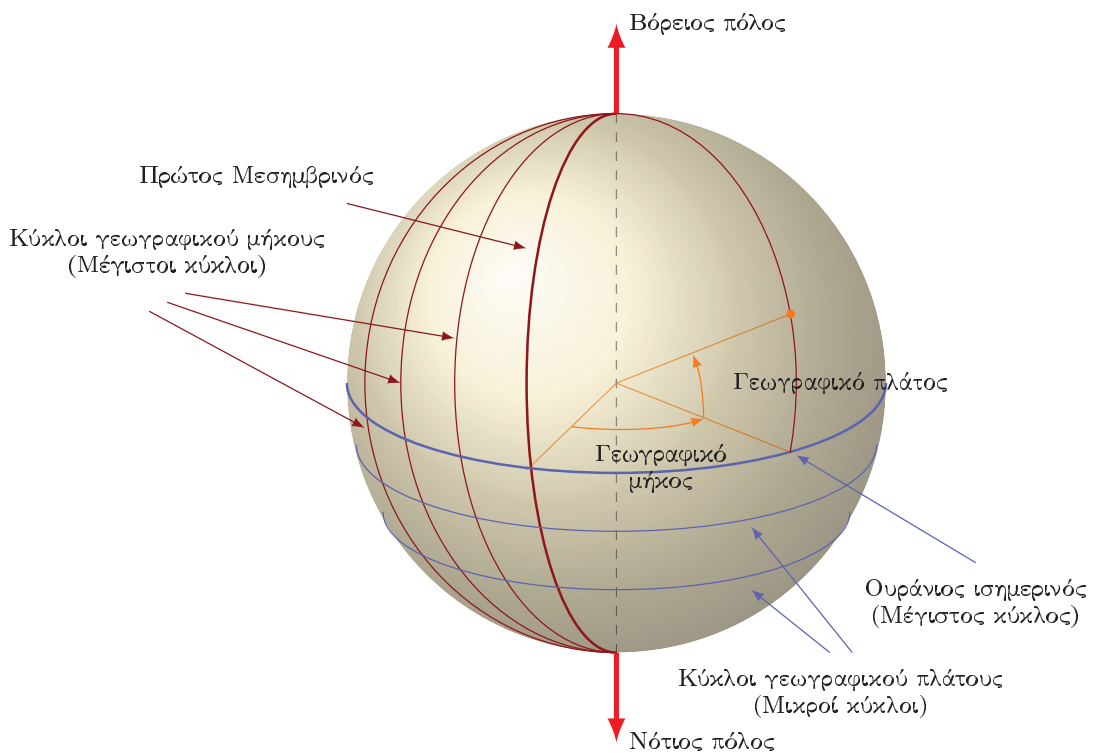
- Σείριος,
- $\alpha$  του Μεγάλου Κυνός, στον κατάλογο Bayer,
- 9 του Μεγάλου Κυνός, στον κατάλογο Flamsteed,
- HD 48915, στον κατάλογο Henry Draper,
- HD -16 1591 στον κατάλογο Bonner Durchmusterung,
- 0640-16 στον κατάλογο συντεταγμένων RA/DEC.

## 2.2 Η ουράνια σφαίρα

Η ουράνια σφαίρα είναι μία φανταστική σφαίρα άπειρης ακτίνας με κέντρο το κέντρο της Γης, πάνω στην επιφάνεια της οποίας υποθέτουμε ότι προβάλλονται όλα τα ουράνια σώματα ανεξάρτητα από την απόστασή τους από εμάς. Θεωρώντας τη Γη ακίνητη, η ουράνια σφαίρα φαίνεται να κινείται κατά την αντίθετη από τη Γη διεύθυνση, από ανατολικά προς τα δυτικά (μία φορά την ημέρα). Αν και δεν είναι η ουράνια σφαίρα που περιστρέφεται γύρω από τη Γη αλλά η Γη περιστρέφεται μέσα της, χρησιμοποιούμε το μοντέλο αυτό για την κατανόηση και την πρόβλεψη των κινήσεων των αστέρων και των πλανητών στον ουρανό. Ο άξονας περιστροφής της

Γης καθορίζει τον φαινόμενο άξονα περιστροφής της ουράνιας σφαίρας και τέμνει την ουράνια σφαίρα στους ουράνιους πόλους που αποτελούν φυσική προέκταση των γεωγραφικών πόλων. Το ισημερινό επίπεδο της Γης είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής της κι άρα το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού είναι φυσική προέκταση του γήινου.

Στη Γη χρησιμοποιούμε τις γραμμές του γεωγραφικού πλάτους και μήκους για να δηλώσουμε την απόσταση ενός αντικειμένου από τον ισημερινό και από τον μεσημβρινό που διέρχεται από το παλιό Βασιλικό Αστεροσκοπείο του Greenwich (σήμερα μουσείο, κοντά στο Λονδίνο), αντίστοιχα. Μεσημβρινοί (meridians) καλούνται οι περιφέρειες των μέγιστων κύκλων που περιέχουν τον άξονα της Γης (άρα και τους πόλους) και επομένως είναι κάθετοι στον ισημερινό. Ο μεσημβρινός που διέρχεται από το αστεροσκοπείο του Greenwich ονομάζεται πρώτος μεσημβρινός ή μεσημβρινός του Greenwich. Το γεωγραφικό πλάτος μετράται πάνω στο μεσημβρινό ενός τόπου, συμβολίζεται με το γράμμα  $\phi$  (και στην αγγλική lat) και παίρνει τιμές από  $0^\circ$  έως  $+90^\circ$  βόρεια και από  $0^\circ$  έως  $-90^\circ$  νότια του ισημερινού (σχήμα 2.3). Ο Βόρειος και ο Νότιος πόλος της Γης έχουν πλάτη  $+90^\circ$  και  $-90^\circ$  αντίστοιχα ενώ



Σχήμα 2.3: Οι γεωγραφικές συντεταγμένες.

ο ισημερινός  $0^\circ$ . Το γεωγραφικό μήκος μετράται πάνω στον ισημερινό από  $0^\circ$  έως  $+180^\circ$  δυτικά του μεσημβρινού του Greenwich και από  $0^\circ$  έως  $-180^\circ$  ανατολικά ή από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  ή με την αναφορά της χρονικής ζώνης (η Γη χωρίζεται σε 24 ζώνες ώρας πλάτους  $15^\circ$ ) του τόπου από  $0h$  έως και  $+12h$  ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich και από  $0h$  έως και  $-12h$  δυτικά (σχήμα 2.3). Έτσι η θέση ενός τόπου (ή ενός σώματος δηλαδή το στίγμα του) δηλώνεται σε μοίρες. Για παράδειγμα για την Αθήνα:

- γεωγραφικό πλάτος  $37.974^\circ$  Βόρεια,
- γεωγραφικό μήκος  $23.73^\circ$  Ανατολικά του Greenwich,

ή με υποδιαιρέσεις της μοίρας (λεπτά και δευτερόλεπτα τόξου) ως:

- γεωγραφικό πλάτος  $37^\circ 58' 27''$  Βόρεια,
- γεωγραφικό μήκος  $23^\circ 43' 48''$  Ανατολικά,

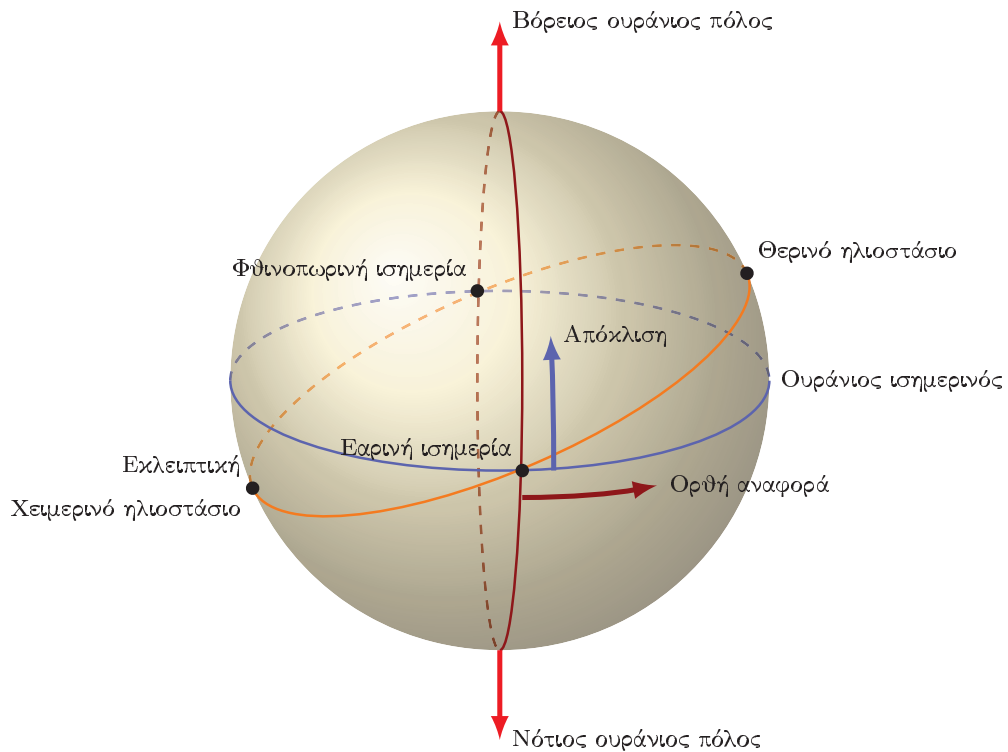
ή στην περίπτωση του γεωγραφικού μήκους με την βοήθεια των ζωνών διαφοράς χρόνου (βλ. § 2.9.3), δηλώνοντας δηλαδή ότι ο Ήλιος στη συγκεκριμένη θέση δύει 2 ώρες και 11 λεπτά νωρίτερα από το Greenwich ως:

- γεωγραφικό πλάτος  $37^\circ 58' 27''$  Βόρεια,
- γεωγραφικό μήκος 2 ώρες και 11 λεπτά Ανατολικά.

### 2.2.1 Ουρανογραφικές συντεταγμένες

Στην ουράνια σφαίρα σε αντιστοιχία με το πλέγμα των γήινων συντεταγμένων (το γεωγραφικό μήκος και πλάτος) μπορεί να οριστεί το σύστημα των ουρανογραφικών συντεταγμένων (απόκλιση, ορθή αναφορά). Το ισοδύναμο των μικρών κύκλων του πλάτους στην ουράνια σφαίρα αποτελούν οι μικροί κύκλοι της απόκλισης (Declination, Dec,  $\delta$ ) και σε αναλογία με τους γήινους πόλους οι ουράνιοι πόλοι έχουν απόκλιση  $\pm 90^\circ$  και ο ουράνιος ισημερινός  $0^\circ$ .

Το ισοδύναμο των «γραμμών γεωγραφικού μήκους» της Γης είναι οι «γραμμές ορθής αναφοράς» στην ουράνια σφαίρα οι οποίες την χωρίζουν σε 24 ίσες ζώνες, σε αντιστοιχία με τις χρονικές ζώνες μέτρησης του γεωγραφικού μήκους. Η ορθή αναφορά (Right Ascension, RA,  $\alpha$ ) μετράται πάνω στον ουράνιο ισημερινό σε μονάδες χρόνου δηλαδή σε ώρες ( $h$ ), λεπτά ( $m$ ) και δευτερόλεπτα ( $s$ ). Επειδή η ουράνια σφαίρα διαιρείται σε 24 τμήματα, κάθε ώρα της ορθής αναφοράς ισούται με  $15^\circ$ . Το σημείο  $0h 0m 0s$  δηλαδή η αρχής μέτρησης της ορθής αναφοράς έχει επιλεγεί να είναι το σημείο στο οποίο φαίνεται ο Ήλιος να τέμνει τον ουράνιο ισημερινό από Βορρά προς Νότο κατά τη φαινόμενη κίνησή του στον ουρανό κατά τη διάρκεια ενός έτους (εαρινό ισημερινό σημείο). Ένας πλήρης κύκλος στην ουράνια



Σχήμα 2.4: Οι ουρανογραφικές συντεταγμένες.

σφαίρα χωρίζεται σε 24 ώρες γιατί τόσο χρειάζεται ο Ήλιος για να κινηθεί μεταξύ δύο ανατολών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.

Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι ότι είναι σταθερό ως προς τους αστέρες και λαμβάνει υπόψη την περιστροφή της Γης (την αγνοεί) κι άρα οι συντεταγμένες των ουράνιων αντικειμένων παραμένουν σταθερές για παρατηρητές σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας της Γης (αυτό ισχύει για τα αντικείμενα που είναι εκτός του πλανητικού μας συστήματος, αντίθετα οι συντεταγμένες των πλανητών αλλάζουν γρήγορα). Εν τούτοις ο παρατηρητής δεν μπορεί να αγνοήσει το γεγονός ότι βρίσκεται πάνω σε μια περιστρεφόμενη πλατφόρμα, τη Γη.

### 2.2.2 Το σύστημα συντεταγμένων του παρατηρητή. Οριζόντιο ή αλταζιμουθιανό σύστημα

Ποτέ δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε ολόκληρη την ουράνια σφαίρα γιατί κάθε παρατηρητής έχει την εντύπωση ότι βρίσκεται σε ένα οριζόντιο επίπεδο και στο κέντρο ενός τεράστιου ημισφαιρίου πάνω στο οποίο τα ουράνια σώματα κινούνται. Το



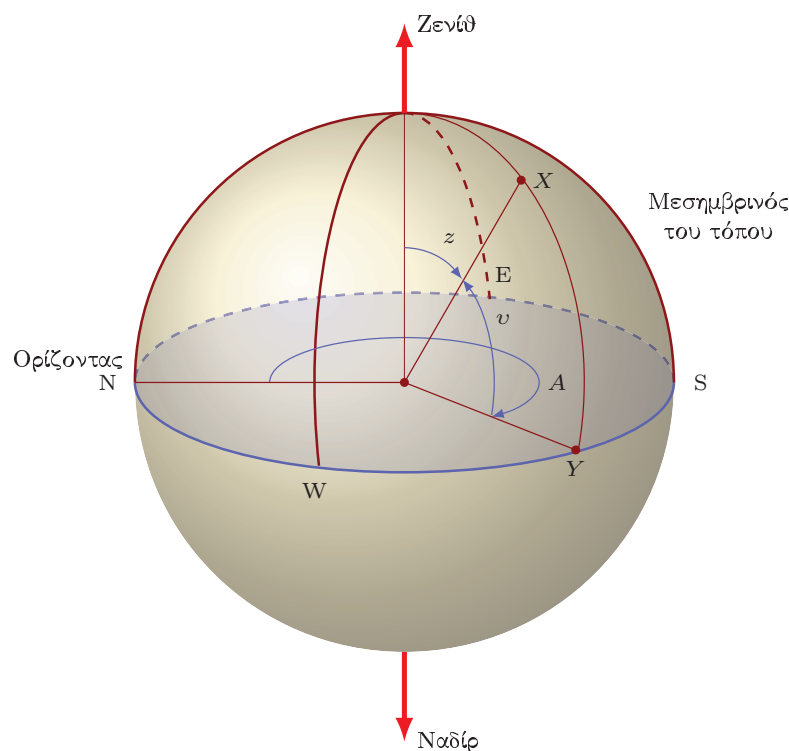
επίπεδο αυτό που εφάπτεται της σφαιρικής Γης στο σημείο του τόπου, καθορίζει τον οριζοντά του παρατηρητή και το σημείο στην κατακόρυφη διεύθυνση ακριβώς πάνω από τον παρατηρητή (που περνά από το κέντρο της Γης και είναι κάθετο στον οριζοντα) ονομάζεται ζενίθ (πάνω από τον οριζοντα, πάντα ορατό,  $Z$ ) ενώ το αντιδιαμετρικό ναδίρ (κάτω από τον οριζοντα, μη ορατό από τον παρατηρητή,  $N$ ) (σχήμα 2.5). Άρα ο οριζοντας είναι ο μέγιστος κύκλος που είναι κάθετος στην κατακόρυφου ενός τόπου  $ZN$ . Επειδή η ακτίνα του ημισφαιρίου της ουράνιας σφαίρας είναι άπειρη σε σχέση με την ακτίνα της Γης, οι διευθύνσεις του βόρειου ουράνιου πόλου και του ουράνιου ισημερινού για τον παρατηρητή είναι παράλληλες με τις πραγματικές τους διευθύνσεις οι οποίες ορίζονται σε σχέση με την ακτίνα της Γης.

Κάθε μέγιστος κύκλος που περιέχει το ζενίθ και είναι κάθετος στον οριζοντα ονομάζεται κατακόρυφος (κύκλος). Ειδικά ο κατακόρυφος που διέρχεται από τους ουράνιους πόλους και το ζενίθ ονομάζεται μεσημβρινός του τόπου και τέμνει τον οριζοντα σε δύο σημεία, στο πλησιέστερο στον βόρειο πόλο, το Βορρά ( $N$ ) και το αντιδιαμετρικό του, το Νότο ( $S$ ) (σχήμα 2.5). Το σημείο του οριζοντα που απέχει  $90^\circ$  κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τον Βορρά για έναν παρατηρητή στο βόρειο ημισφαίριο της Γης ονομάζεται Ανατολή ( $E$ ) και αντίστοιχα  $90^\circ$  από το Νότο, Δύση ( $W$ ) (σχήμα 2.5). Οι θέσεις του ζενίθ και του μεσημβρινού σε σχέση με τους αστέρες αλλάζουν καθώς η ουράνια σφαίρα περιστρέφεται και μεταβάλλονται ανάλογα με τη θέση του παρατηρητή πάνω στη Γη αλλά παραμένουν σταθερές σε σχέση με τον οριζοντα του παρατηρητή. Κάθε ημικύκλιο που περνά από το  $Z$  και  $N$  και τον αστέρα λέγεται κατακόρυφος ή κύκλος ύψος του αστέρα.

Συνήθως είναι χρήσιμο να αναφερόμαστε στα ουράνια αντικείμενα με βάση τον οριζοντα, τα σημεία του οριζοντα και το ζενίθ με τη βοήθεια δύο γωνιών που ορίζουν και το πιο απλό σύστημα συντεταγμένων το αλταζιμουθιανό. Ο μέγιστος κύκλος που περνά από το ζενίθ ( $Z$ ) και τον βόρειο ουράνιο πόλο ( $BO\Pi$ ) τέμνουν τον οριζοντα NESYW στο βορρά ( $N$ ) και στο νότο ( $S$ ), ενώ ο μέγιστος κύκλος WZE (μεσημβρινός) κάθετα στον NPZS τέμνει τον οριζοντα στην δύση ( $W$ ) και στην ανατολή ( $E$ ), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Όπως φαίνεται η γωνιακή απόσταση (σε μοίρες) του βόρειου ουράνιου πόλου ( $BO\Pi$ ) από τον βόρειο οριζοντα είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή ( $LAT$ ). Η θέση ενός αστέρα  $X$  προσδιορίζεται από το αζιμούθιο ( $A$ ) και το ύψος ( $v$ ).

Το ύψος (altitude,  $v$ ) είναι η γωνιακή απόσταση ενός σώματος πάνω από τον οριζοντα του τόπου όπου βρίσκεται ο παρατηρητής και μετράται πάνω στον κατακόρυφο του σώματος με αρχή μέτρησης τον οριζοντα ( $0^\circ$ ) έως  $90^\circ$  στο ζενίθ. Πολλές φορές αντί του ύψους χρησιμοποιείται η ζενίθια απόσταση  $z$  ( $z = 90^\circ - v$ ) δηλαδή το τόξο από το Ζενίθ μέχρι τον αστέρα το οποίο μετράται από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  από το ζενίθ προς το ναδίρ.

Το αζιμούθιο (Azimuth,  $A$ ) είναι η γωνιακή απόσταση ενός σώματος και μετράται πάνω στον οριζοντα με αρχή μέτρησης από το Βορρά από  $0^\circ$  κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού προς την Ανατολή ( $90^\circ$ ), το Νότο ( $180^\circ$ ) και τη Δύση ( $270^\circ$ )



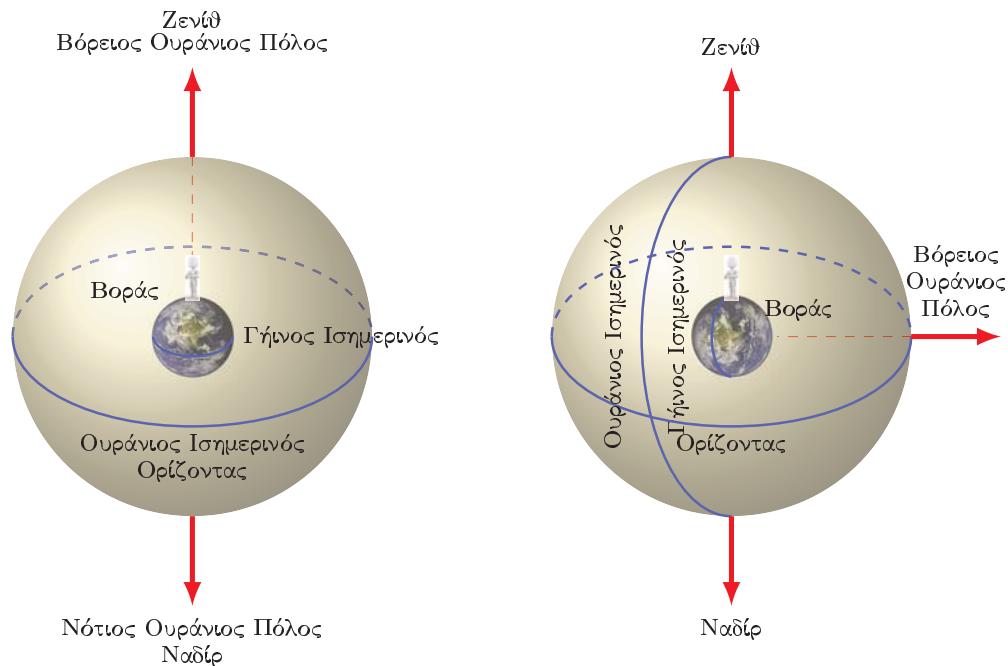
Σχήμα 2.5: Οι αλταζιμουθιακές συντεταγμένες.

μέχρι τον κατακόρυφο του σώματος.

Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι αυτές οι δύο γωνίες καθορίζουν κατά μοναδικό τρόπο τη θέση ενός σώματος στον ουρανό. Το μειονέκτημα όμως είναι ότι για δύο παρατηρητές σε διαφορετικές θέσεις στη Γη, το ύψος και το αζιμούθιο ενός σώματος διαφέρουν και επιπλέον καθώς η Γη περιστρέφεται από την Δύση προς την Ανατολή, για τον κάθε παρατηρητή αυτές οι συντεταγμένες του σώματος αλλάζουν συνέχεια.

### 2.2.3 Σχέση μεταξύ του ουρανογραφικού συστήματος και του αλταζιμουθιακού

Σύμφωνα με τα παραπάνω καθώς ένας παρατηρητής κινείται προς Βορρά, αυξανόμενου του γεωγραφικού του πλάτους ο Βόρειος Ουράνιος Πόλος κινείται πλησιέστερα στο ζενίθ και ταυτίζεται με αυτό όταν ο παρατηρητής φτάσει στο Βόρειο Πόλο. Κατά την αντίστροφη πορεία προς νότια γεωγραφικά πλάτη, ο βόρειος ουράνιος πόλος απομακρύνεται από το ζενίθ και βρίσκεται στον ορίζοντα όταν ο παρατηρητής



Σχήμα 2.6: Η γεωμετρία της ουράνιας σφαίρας για έναν παρατηρητή που βρίσκεται στον Βόρειο πόλο της Γης (αριστερά) και έναν στον ισημερινό της (δεξιά).

φτάσει στον γήινο ισημερινό. Για έναν παρατηρητή σε έναν από τους πόλους (για παράδειγμα το Βόρειο Πόλο) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6:

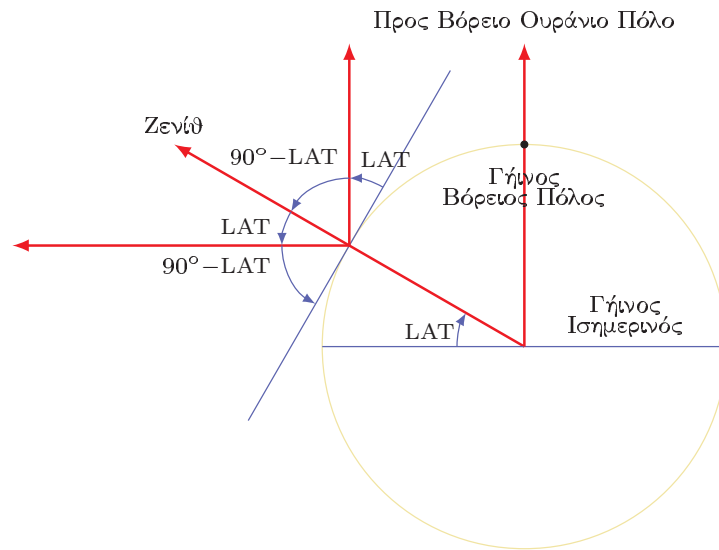
- ο Βόρειος Ουράνιος Πόλος είναι στο ζενίθ και
- ο ουράνιος ισημερινός είναι στο επίπεδο του ορίζοντα.

Για έναν παρατηρητή στον ισημερινό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6:

- ο Βόρειος και Νότιος Ουράνιος Πόλος βρίσκονται στο επίπεδο του ορίζοντα και
- ο ουράνιος ισημερινός είναι στο ζενίθ.

Στην πιο συνηθισμένη περίπτωση όπου ένας παρατηρητής βρίσκεται σε κάποιο άλλο γεωγραφικό πλάτος (LAT) σύμφωνα με το σχήμα 2.7:

- Ο Βόρειος Ουράνιος Πόλος (για LAT  $0^\circ$ ) είναι σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος πάνω από το Βορρά του παρατηρητή πάνω στο μεσημβρινό (για παρατηρητή σε LAT  $< 0^\circ$ , ο Νότιος Ουράνιος Πόλος βρίσκεται σε γωνία ίση με  $-LAT$  πάνω από τον Νότο του παρατηρητή πάνω στον μεσημβρινό) και



Σχήμα 2.7: Η σχέση μεταξύ ουρανογραφικών και αλταζιμουθιακών συντεταγμένων πάνω στην περιφέρεια της Γης.

- Ο Ουράνιος Ισημερινός σχηματίζει με τον μεσημβρινό γωνία ( $90^\circ + \text{LAT}$ ) πάνω από το Βορρά του παρατηρητή και ( $\text{LAT}$ ) μοίρες κάτω από το ζενίθ (προς Νότο).

Όταν ένας αστέρας είναι πάνω στον μεσημβρινό, σύμφωνα με το σχήμα 2.8 υπάρχει μία απλή σχέση που συνδέει την απόκλιση ( $\delta$  ή DEC) και το ύψος του ( $v$ ) με το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή ( $\text{LAT}$ ) η οποία προσδιορίζει και το μέγιστο ύψος στο οποίο μπορεί να φτάσει ένα σώμα στο συγκεκριμένο τόπο και είναι

$$v = \text{DEC} + (90^\circ - \text{LAT}) \quad (2.1)$$

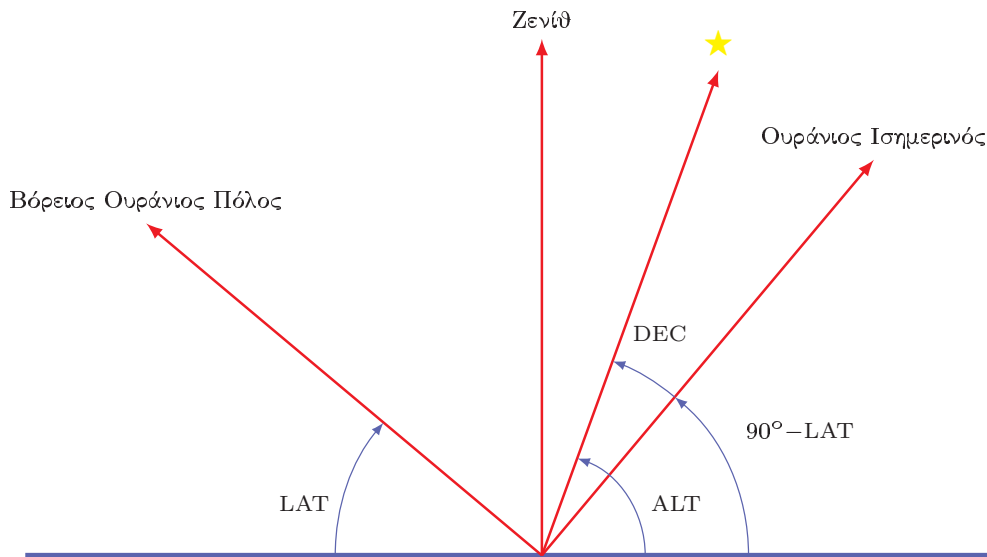
**Παράδειγμα 2.1:** Για την Αθήνα, το γεωγραφικό πλάτος  $\text{LAT}$  είναι ίσο με  $38^\circ$ , οπότε

$$v = \text{DEC} + (90^\circ - 38^\circ) = \text{DEC} + 52^\circ. \quad (2.2)$$

Τα αντικείμενα με  $\text{DEC} = \text{LAT}$  έχουν ύψος  $90^\circ$  και άρα βρίσκονται στο ζενίθ του παρατηρητή ενώ ο ουράνιος ισημερινός ( $\text{DEC} = 0^\circ$ ) έχει ύψος

$$v = 90^\circ - \text{LAT} = 52^\circ. \quad (2.3)$$

Το ύψος ενός σώματος (αστέρας, πλανήτη, Σελήνη) έχει πρακτική σημασία γιατί καθορίζει πόσο ψηλά στον ουρανό μπορεί να είναι σε μία συγκεκριμένη νύχτα και άρα τότε ένα σώμα είναι ορατό κι άρα παρατηρήσιμο αφού ύψος μικρότερο από μηδέν



Σχήμα 2.8: Η σχέση μεταξύ ουρανογραφικών και αλταζιμουθιακών συντεταγμένων για έναν αστέρα με βάση τον ορίζοντα του παρατηρητή.

σημαίνει ότι το σώμα είναι κάτω από τον ορίζοντα. □

**Παράδειγμα 2.2:** Η μέγιστη απόκλιση της Σελήνης είναι  $+28.5^\circ$  και άρα το μέγιστο ύψος στο οποίο μπορούμε να δούμε τη Σελήνη από την Αθήνα είναι

$$v = +28.5^\circ + (90^\circ - 38^\circ) = 80.5^\circ. \quad (2.4)$$

□

**Παράδειγμα 2.3:** Ποιό είναι το μέγιστο ύψος του Ήλιου από την Αθήνα εάν οι συντεταγμένες του σε κάποια ημερομηνία είναι  $RA=2h\ 8m$  και  $DEC=+14^\circ\ 20'$ ;

Επειδή για την Αθήνα

$$v = DEC + 52^\circ, \quad (2.5)$$

το μέγιστο ύψος του Ηλίου θα είναι

$$v_{\max} = 14^\circ\ 20' + 52^\circ = 66^\circ\ 20'. \quad (2.6)$$



Επιπλέον το ύψος ενός σώματος συνδέεται με την αέρια μάζα (airmass), που αποτελεί μέτρο της ποσότητας της ατμόσφαιρας που παρεμβάλεται μεταξύ του φωτός του σώματος και του παρατηρητή. Όσο μεγαλύτερη είναι η αέρια μάζα κατά την παρατήρηση ενός αντικειμένου, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα φωτός σκεδάζεται ή απορροφάται από την ατμόσφαιρα κι άρα το σώμα θα φαίνεται αμυδρότερο. Άρα μπορεί κανείς να μετατρέψει τις συντεταγμένες από το ένα σύστημα στο άλλο χρησιμοποιώντας τριγωνομετρία σφαιρικών τριγώνων αρκεί να γνωρίζει

- Τη θέση του παρατηρητή στη Γη και
- την ώρα παρατήρησης.

### 2.2.4 Ισημερινές συντεταγμένες

Σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων λαμβάνοντας ως βασικούς κύκλους τον ουράνιο ισημερινό και το μεσημβρινό του τόπου, το ανάλογο του γεωγραφικού μήκους είναι η ωριαία γωνία (hour angle,  $H$  ή  $HA$ ) και του πλάτους η απόκλιση ( $\delta$ ) η οποία μετράται όπως στις ουρανογραφικές συντεταγμένες (σχήμα 2.9). Η ωριαία γωνία ( $H$ ) ενός αστέρα ( $X$ ) μετράται στον ισημερινό, με αρχή τον μεσημβρινό του παρατηρητή προς δυσμάς (και για τα δύο ημισφαίρια) μέχρι τον μεσημβρινό του αστέρα (από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ ). Στο σχήμα 2.9 η ωριαία γωνία  $H$  του αστέρα  $X$ , είναι ίση με το τόξο  $BT$  αλλά όχι με το τόξο  $XU$ . Η απόσταση από τον βόρειο πόλο της ουράνιας σφαίρας δηλαδή το συμπληρωματικό τόξο  $BO\Pi-X$  ονομάζεται πολική απόσταση  $P$ .

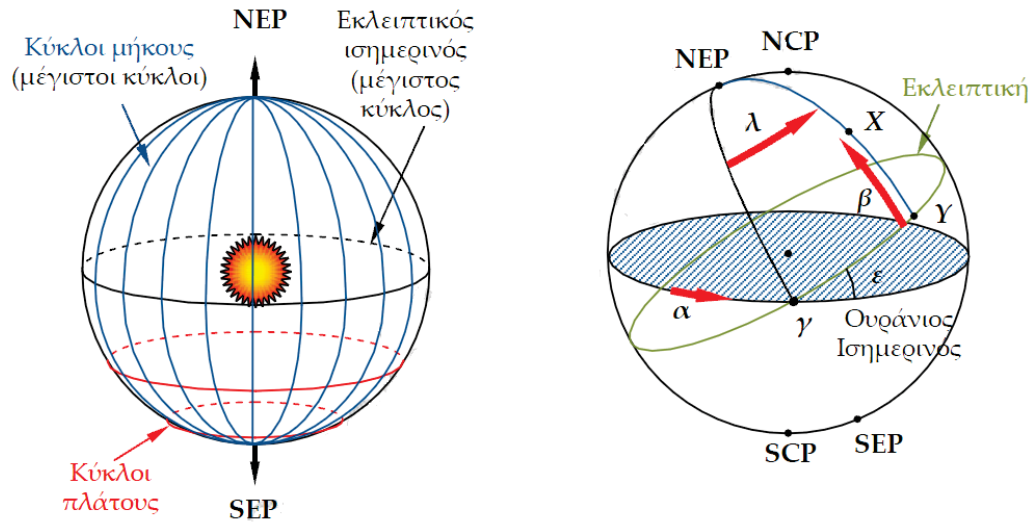
Λόγω της περιστροφής της Γης, η ωριαία γωνία αυξάνεται από  $0^\circ$  σε  $360^\circ$  σε 24 ώρες και γι αυτό δείχνει τη γωνιακή απόσταση μεταξύ του σώματος και του μεσημβρινού (1 ώρα= $15^\circ$ ). Άρα η ωριαία γωνία ενός αντικειμένου αποτελεί μέτρο του χρόνου που πέρασε αφότου διέσχισε τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Γι αυτό και συχνά μετράται σε ώρες και υποδιαιρέσεις της παρά σε γωνιακά μεγέθη (όπως το γεωγραφικό μήκος).

**Παράδειγμα 2.4:** Εάν ένα σώμα έχει ωριαία γωνία 2.5 ώρες σημαίνει ότι η διέλευσή του από τον τοπικό μεσημβρινό έγινε πριν από 2.5 ώρες και βρίσκεται τώρα  $37.5^\circ (=2.5 \times 15^\circ)$  δυτικά του μεσημβρινού. Αρνητική ωριαία γωνία δείχνει το χρονικό διάστημα μέχρι την επόμενη διέλευση από τον μεσημβρινό. Μηδενική ωριαία γωνία  $HA=0$  δείχνει ότι το σώμα βρίσκεται πάνω στον μεσημβρινό.



Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι αστέρες έχουν το μέγιστο ύψος τους όταν διασχίζουν το μεσημβρινό του τόπου. Λόγω της μεταβολής της ωριαίας γωνίας με

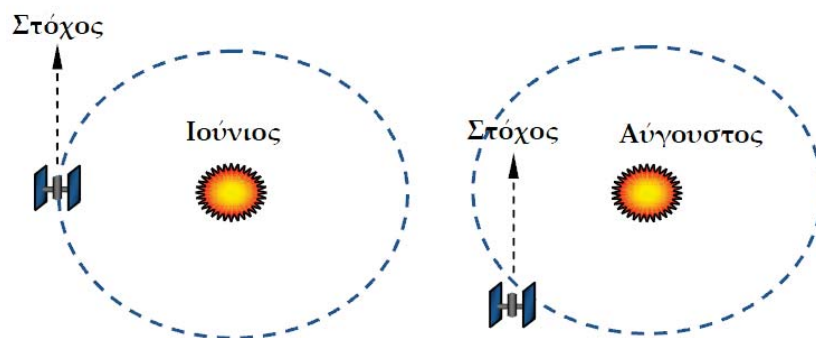




Σχήμα 2.10: Το σύστημα εκλειπτικών συντεταγμένων.

από τον Ήλιο προκειμένου να μην καταστραφούν οι ανιχνευτές τους.

Επιπλέον στην περίπτωση εκθέσεων μεγάλης διάρκειας (ημερών ή εβδομάδων), λόγω της μετακίνησης της Γης στην τροχιά της, στο πεδίο οράσεως του τηλεσκοπίου ένα αντικείμενο που αρχικά ήταν πολύ απομακρυσμένο από τον Ήλιο παρατηρείται να μετατοπίζεται πλησίον του, γι αυτό αυτές οι εκθέσεις (Hubble Deep Field, Hubble Ultra Deep Field, Chandra Deep Field South) επιλέγονται κοντά στους πόλους της εκλειπτικής δηλαδή σε κάθετη θέση από τον Ήλιο (σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11: Χρήση των εκλειπτικών συντεταγμένων.



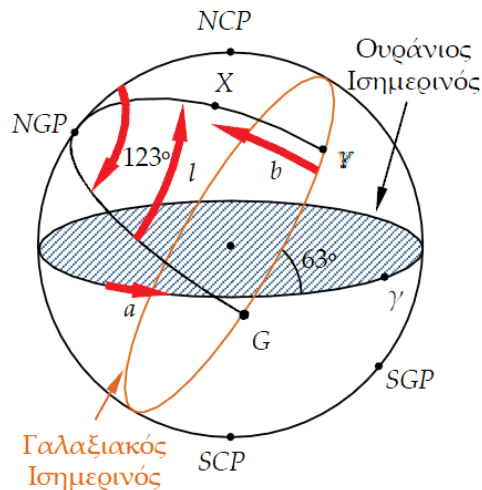
### 2.2.6 Γαλαξιακές συντεταγμένες

Για τη μελέτη της κατανομής των αστέρων στο Γαλαξία μας ή μακρινών γαλαξιών χρησιμοποιούνται (σχήμα 2.12) το γαλαξιακό πλάτος ( $b$ ) που μετράται βόρεια από το επίπεδο του Γαλαξία προς τον Βόρειο Γαλαξιακό Πόλο (NGP) ο οποίος είναι κοντά στην Κόμη της Βερενίκης ( $RA \simeq 12h\ 52m$  και  $Dec \simeq 26^\circ\ 19'$ ) από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ . και το γαλαξιακό μήκος ( $l$ ) που μετράται στο γαλαξιακό επίπεδο ανατολικά από τη διεύθυνση του γαλαξιακού κέντρου (GC) που βρίσκεται στον αστερισμό του Τοξότη με συντεταγμένες  $RA \simeq 17h\ 45m$  και  $Dec \simeq 29^\circ\ 22'$  και αυξάνεται προς Βορά αυξανομένης της απόκλισης.

Το γαλαξιακό επίπεδο έχει προσδιοριστεί με ακρίβεια από μετρήσεις της κατανομής των νεφών ουδέτερου υδρογόνου ενώ το γαλαξιακό κέντρο καθορίζεται με ακρίβεια από το γαλαξιακό μήκος του Βόρειου Ουράνιου Πόλου (NCP) που είναι  $123^\circ$ . Το γαλαξιακό μήκος του αστερά  $X$  δίνεται από τη γωνία μεταξύ του GC και του  $Y$ . Επιπλέον, το επίπεδο του ηλιακού συστήματος είναι σχεδόν κάθετο στο γαλαξιακό επίπεδο.

Ανακεφαλαιώνοντας συνοψίζουμε τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων κυρίων συστημάτων συντεταγμένων που ορίζονται με βάση την ουράνια σφαίρα, έναν πρωτεύοντα μέγιστο κύκλο και έναν δευτερεύοντα μέγιστο κύκλο (μέγιστο κύκλο που περνά από τους πόλους του πρωτεύοντος) στον παρακάτω πίνακα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μπορούμε να μετατρέψουμε τις συντεταγμένες από το ένα σύστημα στο άλλο χρησιμοποιώντας την περιστροφή των γωνιών Euler γύρω από άξονες σε ένα Καρτεσιανό σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 2.12: Το σύστημα γαλαξιακών συντεταγμένων.

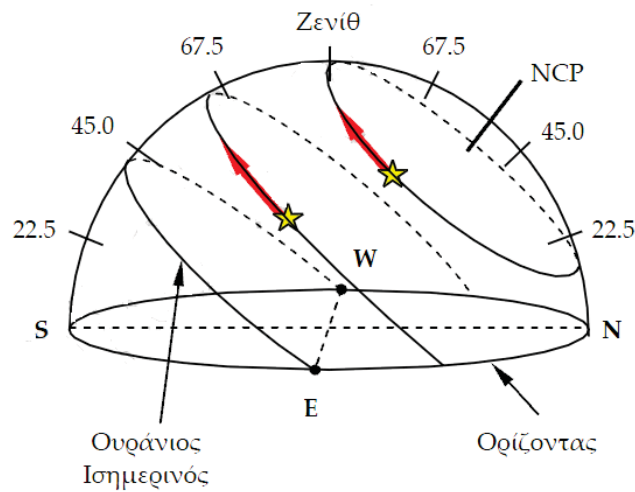
Πίνακας 2.1: Συστήματα συντεταγμένων

Σύστημα συντεταγμένων	Πρωτεύον μέγ. κύκλος	Δευτερεύον μέγ. κύκλος	Συντεταγμένες
Οριζόντιες τοπικό σύστημα του παρατηρητή	Ορίζοντας του τόπου του παρατηρητή	Μεσημβρινός B-N	Ύψος $\nu$ Αζιμούθιο $A$
Ουρανογραφικές	Ουράνιος ισημερινός	Μεσημβρινός του τόπου (B-N-Z)	Ορθή αναφορά $\alpha$ Απόκλιση $\delta$
Ισημερινές	Ουράνιος ισημερινός	Μεσημβρινός του τόπου (B-N-Z)	Ωριαία γωνία $H$ Απόκλιση $\delta$
Εκλειπτικές	Επίπεδο τροχιάς της Γης	Μέγιστος κύκλος που περνά από τους πόλους της εκλειπτικής και το εαρινό σημείο	Εκλειπτικό μήκος $\lambda$ Εκλειπτικό πλάτος $\beta$
Γαλαξιακές	Επίπεδο του Γαλαξία	Γαλαξιακό κέντρο	Γαλαξιακό μήκος $l$ Γαλαξιακό πλάτος $b$

### 2.3 Ουράνιες κινήσεις

Τα αντικείμενα κινούνται είτε πραγματικά είτε φαινομενικά λόγω της κίνησης της Γης. Από την περιστρεφόμενη πλατφόρμα παρατήρησης (τη Γη) βλέπουμε όλο τον ουρανό (όπως ορίζεται από τον μεσημβρινό του παρατηρητή) να γυρίζει γύρω από φανταστικά σημεία (ουράνιους πόλους) κάθε 24 ώρες ως αποτέλεσμα της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της. Αυτή η κίνηση που ονομάζεται ημερήσια κίνηση της ουράνιας σφαίρας επηρεάζει όλα τα αντικείμενα χωρίς να αλλάζει τις σχετικές τους θέσεις. Τα μόνα σημεία που δεν φαίνεται να μετακινούνται είναι ο βόρειος και νότιος ουράνιος πόλος γιατί βρίσκονται πάνω στον άξονα περιστροφής.

Αν και σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα αγνοήσαμε την περιστροφή της Γης, καθώς η Γη περιστρέφεται από τη Δύση στην Ανατολή, οι αστέρες φαίνονται να περιστρέφονται δηλαδή να διαγράφουν τροχιές σε παράλληλους κύκλους (κύκλοι απόκλισης) με τον ουράνιο ισημερινό (ή πάνω σε αυτόν) από την Ανατολή στη Δύση όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13 όπου σημειώνονται διαφορετικά ύψη ( $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ) και τα τόξα σταθερής απόκλισης - οι αστέρες και οι κύκλοι απόκλισης είναι σταθεροί πάνω στην Ουράνια Σφαίρα. Από τη στιγμή που δεν μεταβάλλεται η απόκλιση ενός αστέρα, οι κύκλοι απόκλισης δείχνουν την πορεία του στον ουρανό



Σχήμα 2.13: Η ημερήσια κίνηση ενός αστέρα.

από την ανατολή μέχρι και τη δύση του. Ο ουράνιος Ισημερινός τέμνει τον ορίζοντα ακριβώς στην Ανατολή και στη Δύση του παρατηρητή όπως ο μεσημβρινός στο Βορρά και στο Νότο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο μεσημβρινός του τόπου χωρίζει τις πρωινές από τις απογευματινές θέσεις του Ήλιου. Το πρωί ο Ήλιος είναι «προ του μεσημβρινού» (λατινικά «ante meridiem») ή ανατολικά του μεσημβρινού και συντομογραφικά δηλώνεται ως «π.μ.» («a.m»). Το μεσημέρι βρίσκεται «μετά το μεσημβρινό» (λατινικά «post meridiem») ή δυτικά του μεσημβρινού και συντομογραφικά δηλώνεται ως «μ.μ.» («p.m.»).

Για την απλή περίπτωση όπου ο παρατηρητής είναι στον Βόρειο Πόλο, ο ουρανός φαίνεται να περιστρέφεται γύρω από το ζενίθ και επειδή το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού είναι το επίπεδο του ορίζοντα, τα αντικείμενα στον ουράνιο ισημερινό φαίνεται να περιστρέφονται γύρω από τον ορίζοντα.

Για ένα παρατηρητή στον ισημερινό ο ουρανός φαίνεται να περιστρέφεται γύρω από τη διεύθυνση Βοράς - Νότος και επειδή το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού διέρχεται από ζενίθ τα αντικείμενα στον ουράνιο ισημερινό φαίνεται να ανατέλλουν από τον ανατολικό ορίζοντα, να μεσουρανούν στο ζενίθ και μετά να δύουν στον δυτικό ορίζοντα.

**Παράδειγμα 2.5:** Ποιοί αστέρες είναι πάντα ορατοί για έναν παρατηρητή σε γεωγραφικό πλάτος  $LAT$ ;

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.9 για έναν παρατηρητή στο βόρειο ημισφαίριο (με πλάτος  $LAT > 0^\circ$ ) ο Βόρειος Ουράνιος Πόλος σχηματίζει γωνία  $LAT$  πάνω από τον

βόρειο ορίζοντα στον μεσημβρινό, οπότε τα σώματα που είναι πιο κοντά στον ΒΟΠ βρίσκονται για περισσότερο χρόνο πάνω από τον ορίζοντα και πλησιέστερα στον ΒΟΠ όταν ανατέλλουν ή δύουν. Για να είναι ορατός σε όλη τη διάρκεια του 24 ωρου ένας αστέρας θα πρέπει ο κύκλος απόκλισής του να μην τέμνει τον ορίζοντα του παρατηρητή και συγκεκριμένα η κάτω διάβαση του να είναι στο όριο του ορίζοντα δηλαδή

$$\delta = 90^\circ - \text{LAT}. \quad (2.7)$$

□

Ένας αστέρας με απόκλιση  $\delta > 90^\circ - \text{LAT}$  (ή πολική απόσταση  $P < \text{LAT}$ ) δεν δύει ποτέ κάτω από τον ορίζοντα κι άρα είναι πάντα ορατός (ολόκληρη η διαδρομή του είναι ορατή) σε όλο το 24ωρο γι αυτό ονομάζεται *αιφανής* ή «περί του πόλου» (*circumpolar*). Για το Βόρειο ημισφαίριο μπορούμε να δούμε ή να φωτογραφίσουμε (σχήμα 2.14) ολόκληρη την κυκλική τροχιά έξι *αιφανών* αστερισμών: της Μεγάλης Άρκτου, της Μικρής Άρκτου, του Κηφέα, του Δράκοντα, της Καμηλοπάρδαλης και της Κασσιόπης.

Αντιθέτως οι αστέρες που διανύουν όλη την τροχιά τους κάτω από τον ορίζοντα (είναι αυτοί που είναι κοντά στον Νότιο Πόλο για τον παρατηρητή του Βόρειου ημισφαιρίου) δεν φαίνονται ποτέ και ονομάζονται *αφανείς*. Αυτοί έχουν πολική απόσταση  $P < \text{LAT}$  από τον Νότιο Ουράνιο Πόλο ή  $P > 180^\circ - \text{LAT}$  από το Βόρειο κι άρα βρίσκονται σε απόκλιση  $\delta < \text{LAT} - 90^\circ$ . Το αντίθετο ισχύει για έναν



Σχήμα 2.14: Τα ίχνη των αστερών γύρω από τον Βόρειο Ουράνιο Πόλο για έκθεση 10 ωρών (πηγή: [www.theage.com.au](http://www.theage.com.au)).

παρατηρητή στο Νότιο Ημισφαίριο.

Για να τέμνει η τροχιά του αστέρα τον ορίζοντα κατά τη διάρκεια του 24ωρου κι άρα ο αστέρας να φαίνεται σε κάποιο τμήμα της διαδρομής του (αμφιφανής) θα πρέπει να ισχύει η σχέση  $LAT - 90^\circ < \delta < 90^\circ - LAT$ .

Αυτό σημαίνει ότι για έναν παρατηρητή στους γήινους πόλους, όλοι οι αστέρες είναι αιφανείς ενώ δε βλέπει κανέναν από τους αστέρες του αντίθετου ημισφαιρίου. Για παρατηρητή που βρίσκεται στον γήινο ισημερινό, κανείς από τους αστέρες δεν είναι αιφανής και βλέπει όλη την ουράνια σφαίρα κατά τη διάρκεια του έτους.

Ένας αστέρας που βρίσκεται σε γωνία μεγαλύτερη από  $LAT$ , φτάνει σε ένα μέγιστο ύψος πάνω από τον ορίζοντα (διέλευση αστέρα) και λέμε ότι μεσουρανεί τη στιγμή της διάβασης του από τον μεσημβρινό του τόπου του παρατηρητή και στη συνέχεια δύει. Είναι εμφανές ότι ένα σώμα μεσουρανεί την ίδια στιγμή για όλους τους παρατηρητές που βρίσκονται στον ίδιο μεσημβρινό (ίδιο γεωγραφικό μήκος).

Από την παραπάνω ανάλυση αιτιολογείται η μέτρηση της ορθής αναφοράς με μονάδες χρόνου. Ο μεσημβρινός είναι σαν ένα ρολόι χειρός, οπότε οι γραμμές απόκλισης που τον διασχίζουν μας λένε και τί ώρα είναι (με προσέγγιση γιατί η πραγματική περίοδος περιστροφής της Γης σε σχέση με τους αστέρες είναι 23 ώρες και 56 λεπτά). Προκειμένου να συνδέσουμε την επίδραση της περιστροφής της Γης, η ωριαία γωνία δείχνει το χρονικό διάστημα πριν ή μετά τη διέλευση κάθε αντικειμένου. Όπως έχει αναφερθεί στις ισημερινές συντεταγμένες η ωριαία γωνία είναι η γωνία που σχηματίζει στον ουρανό, ο μεσημβρινός και η γραμμή της ορθής αναφοράς του εν λόγω αντικειμένου. Σε αντίθεση με την ορθή αναφορά που είναι πάντα σταθερή, η  $HA$  των αντικειμένων αυξάνει συνεχώς και δίνεται από τη σχέση  $HA = LST - RA$ , όπου  $LST$  ο τοπικός αστρικός χρόνος (βλ. §2.9.1).

Εισάγοντας και τη συντεταγμένη της ωριαία γωνίας μπορούμε να δούμε ότι ανάλογα με τη θέση (γεωγραφικό πλάτος παρατηρητή) μερικοί αστέρες είναι ορατοί πάντα<sup>3</sup>, άλλοι ανατέλλουν και δύουν και άλλοι δεν είναι ποτέ ορατοί. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, ο αστέρας  $X$  ή πλανήτης, διασχίζει τον ορίζοντα στα σημεία  $L$  και  $V$ , κινούμενος από το  $L$  διαμέσου του  $U$  πάνω στον μεσημβρινό προς το  $V$ .

Επιπροστιθέμενη σε αυτήν την ημερήσια κίνηση είναι η κίνηση μερικών σωμάτων που κινούνται (πλανώνται) στην ουράνια σφαίρα μεταβάλλοντας τις σχετικές τους θέσεις. Αυτά είναι οι πλανήτες, ο Ήλιος και η Σελήνη. Αυτή η πραγματική κίνηση δεν παρατηρείται στους μακρινούς αστέρες γιατί λόγω της μεγάλης απόστασης η κίνηση φαίνεται πολύ μικρή. Επιπλέον κατά τη διάρκεια ενός έτους οι κοντινότεροι αστέρες φαίνονται να κινούνται λόγω της ετήσιας περιφοράς της Γης και η κίνηση αυτή ονομάζεται παράλλαξη (βλ. κεφάλαιο 7). Οι περισσότεροι αστέρες πάντως είναι πολύ μακριά ώστε αυτή η φαινόμενη κίνησή τους να μην μπορεί να παρατηρηθεί. Ακόμα και για τους κοντινότερους απαιτείται καλό ανιχνευτικό σύστημα στο τηλεσκόπιο για να ανιχνευθεί.

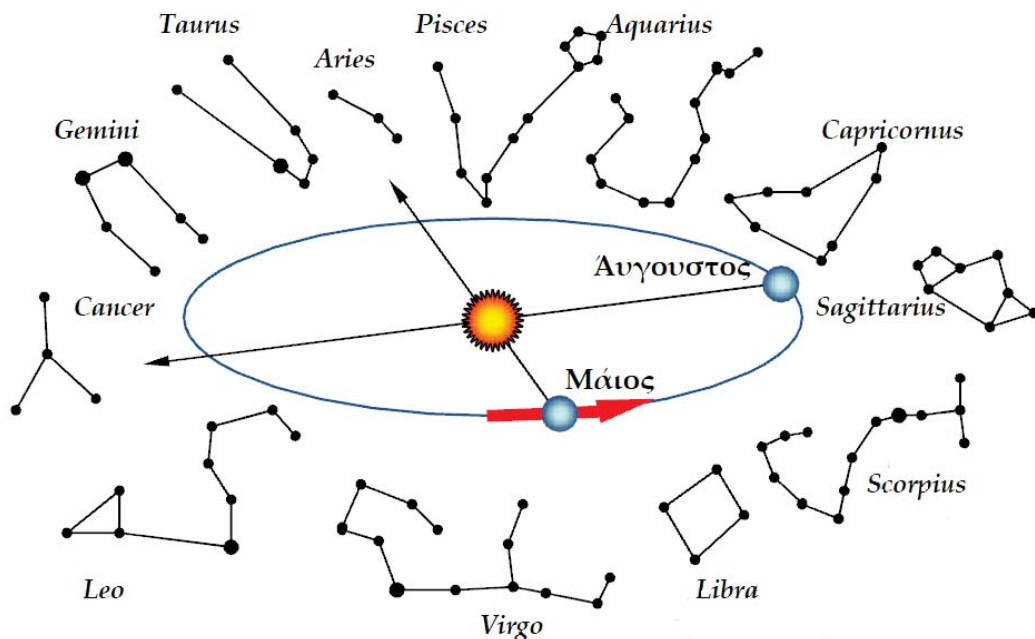
<sup>3</sup>«ορατοί πάντα», με την έννοια ότι φαίνονται πάντα στον ουρανό εάν δεν υπήρχε το ηλιακό φως!

## 2.4 Φαινόμενη κίνηση του Ήλιου στην ουράνια σφαίρα - Εποχές

Ο Ήλιος όχι μόνο περιστρέφεται μαζί με τους αστέρες στην ουράνια σφαίρα κάθε ημέρα αλλά και κινείται πολύ αργά σε σχέση με αυτούς. Οι εικονικές του κινήσεις είναι

- Ημερήσια κίνηση από ανατολικά προς δυτικά λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της με περίοδο 24 ώρες.
- Μετατόπιση ανατολικά σε σχέση με τους αστέρες περίπου  $10^\circ$  την ημέρα με περίοδο περίπου 365.25 ημέρες ( $3600/365.25$  ημ.).

Η δεύτερη κίνησή του οφείλεται στο γεγονός ότι η Γη εκτελεί μία περιστροφή γύρω από τον Ήλιο και ο Ήλιος είναι πολύ κοντύτερα στη Γη απ' ό τι οι αστέρες. Ένας παρατηρητής που σημειώνει κάθε μήνα ποιού αστερισμοί φαίνονται αρχικά πάνω από τον δυτικό ορίζοντα μετά το ηλιοβασίλεμα, θα παρατηρήσει ότι εμφανίζονται νέοι και προχωράνε σταδιακά κατά μήκος μίας ζώνης στην ουράνια σφαίρα. Αυτή η μεταβολή οφείλεται στην ετήσια κίνηση της Γης. Καθώς η Γη κινείται γύρω από



Σχήμα 2.15: Ο ζωδιακός κύκλος και η όψη του από τη Γη κατά τους μήνες Μάιο και Αύγουστο.

τον Ήλιο, βλέπουμε τους αστέρες στην ουράνια σφαίρα εκτός από αυτούς που δεν βρίσκονται στην ευθεία του Ήλιου και αποκρύπτονται από το φως του. Αυτή η ζώνη των 13 αστερισμών κατά μήκος της εκλειπτικής ονομάζεται ζωδιακός κύκλος (αν και παραδοσιακά αναγνωρίζονται οι 12 αστερισμοί πλην του Οφιούχου) και οι αστερισμοί πάνω σε αυτή τη λωρίδα είναι γνωστοί ως ζώδια. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15 στις αρχές Μαΐου η ευθεία που συνδέει τη Γη με τον Ήλιο δείχνει στον αστερισμό του Κριού κι άρα οι αστέρες του Κριού δεν φαίνονται<sup>4</sup>. Όμως μετά τη δύση του Ήλιου μπορούμε να δούμε το γειτονικό του αστερισμό τον Ταύρο να ανατέλει πάνω από τον δυτικό ορίζοντα. Στις αρχές Ιουνίου λόγω της μετακίνησης της Γης, ο Ήλιος προβάλλεται στον Ταύρο κι άρα οι αστέρες του δεν φαίνονται ενώ μετά το ηλιοβασίλεμα μπορούμε να δούμε το γειτονικό του αστερισμό, τους Διδύμους να ανατέλει πάνω από τον δυτικό ορίζοντα κ.ο.κ.. Η ετήσια κίνηση της Γης μας επιτρέπει να δούμε αστέρες που αποκρύβονται από το φως του Ήλιου και κάνει κάθε αστέρα να ανατέλλει 3 λεπτά και 56 δευτερόλεπτα νωρίτερα κάθε νύχτα (περίπου 4 λεπτά). Σε ένα χρόνο η συνολική καθυστέρηση είναι 24 ώρες κι άρα ένα χρόνο αργότερα όταν η Γη βρεθεί στο ίδιο ακριβώς σημείο της τροχιάς της, η εικόνα του ουρανού θα είναι ακριβώς η ίδια. (Το εάν φαίνεται ένας αστερισμός από ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό τόπο εξαρτάται από την απόκλιση του αστερισμού).

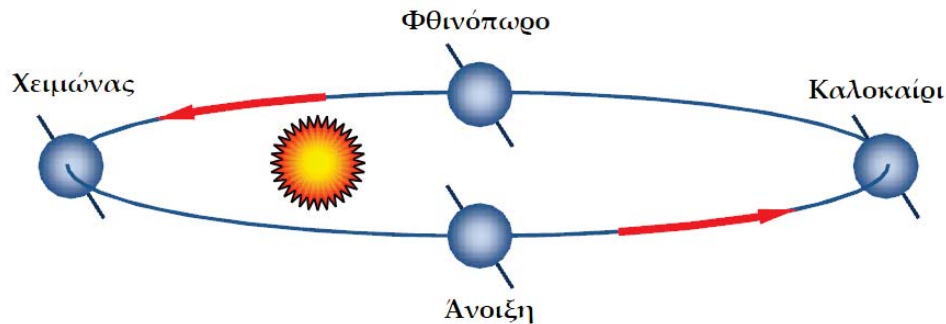
Επειδή ο άξονας περιστροφής της Γης (που καθορίζει την ουράνια σφαίρα) δεν είναι κάθετος στην ετήσια τροχιά της γύρω από τον Ήλιο αλλά σχηματίζει γωνία περίπου  $67^\circ$  με το επίπεδο της τροχιάς, η φαινόμενη κίνηση του Ήλιου στον ουρανό δηλαδή η διαδρομή που φαινομενικά ακολουθεί ο Ήλιος κατά τη διάρκεια ενός έτους (εκλειπτική) δεν γίνεται πάνω στον ισημερινό αλλά σε ένα κύκλο που έχει κλίση  $23.5^\circ$  σε σχέση με τον ουράνιο ισημερινό. Αυτή η κλίση ονομάζεται λόξωση (obliquity) και είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο των εποχών και τη μεταβολή της διάρκειας της ημέρας και της νύχτας σε ένα γεωγραφικό τόπο. Η φαινόμενη διαδρομή του Ήλιου ονομάζεται εκλειπτική (γιατί εκεί συμβαίνουν οι εκλείψεις) και βρίσκεται ψηλότερα το καλοκαίρι απ' ότι το χειμώνα σε σχέση με τον ουράνιο ισημερινό.

### 2.4.1 Το φαινόμενο των εποχών

Η εναλλαγή των εποχών οφείλονται στην κλίση του άξονα περιστροφής της Γης ( $23.5^\circ$ ) με το επίπεδο της τροχιάς της, δηλαδή στη γωνία που σχηματίζει η εκλειπτική με τον ουράνιο ισημερινό και άρα στην γωνία που σχηματίζουν οι ηλιακές ακτίνες με το έδαφος. Αυτή η κλίση έχει ως αποτέλεσμα το ημισφαίριο που κάθε φορά «κλίνει» προς τον Ήλιο - κι άρα οι αντίστοιχοι γεωγραφικοί τόποι - να δέχεται περισσότερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφορετικές χρονικές περιόδους κατά την περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο, να θερμαίνεται περισσότερο

<sup>4</sup>Στην πραγματικότητα επειδή οι αστερισμοί εκτείνονται σε μεγάλη έκταση ( $\approx 30^\circ$ ) σε σχέση με τον Ήλιο ( $\approx 0.5^\circ$ ) είναι ακόμα ορατοί

κι άρα να έχει καλοκαίρι, σε αντίθεση με το αντίθετο ημισφαίριο που αποκλίνει και έχει χειμώνα. Κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο κανένα από τα δύο ημισφαίρια δεν κλίνει ή αποκλίνει άρα δεν έχουν ούτε χειμώνα, ούτε καλοκαίρι (σχήμα 2.16). Στο ημισφαίριο που έχει καλοκαίρι, το τμήμα του που φωτίζεται από τον Ήλιο είναι μεγαλύτερο από το τμήμα που δεν φωτίζεται κι άρα η διάρκεια της ημέρας το καλοκαίρι είναι μεγαλύτερη από 12 ώρες.



Σχήμα 2.16: Οι σχετικές θέσεις Γης και Ήλιου στις διάφορες εποχές του έτους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η διαδρομή του Ήλιου στον ουρανό μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή και σηματοδοτείται από κάποιες ημερομηνίες που καθορίζουν την έναρξη των εποχών (και τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας) σε κάθε γεωγραφικό τόπο στη Γη, οι οποίες ονομάζονται ηλιοστάσια και ισημερίες. Υπάρχουν δύο ισημερίες και δύο ηλιοστάσια μέσα στο χρόνο με αντίθετες συνέπειες για τα δύο ημισφαίρια της Γης.

### 2.4.2 Ισημερίες και ηλιοστάσια

Κατά τις ημερομηνίες όπου παρατηρούνται οι ισημερίες, όπως μαρτυρεί και η ετυμολογία, όλοι οι γεωγραφικοί τόποι έχουν ίση μέρα και ίση νύχτα γιατί η Γη βρίσκεται σε εκείνες τις θέσεις της τροχιάς της που ο άξονας δεν έχει κάποια κλίση ως προς τον Ήλιο. Αυτές είναι:

- η εαρινή ισημερία στις 21 Μαρτίου γιατί σηματοδοτεί την έναρξη της άνοιξης για το Β. Ημισφαίριο (και του φθινοπώρου για το Νότιο) και
- η φθινοπωρινή στις 23 Σεπτεμβρίου γιατί σηματοδοτεί την έναρξη του φθινοπώρου για το Β. Ημισφαίριο (και της άνοιξης για το Νότιο).

Κατά τις ημερομηνίες των ηλιοστασίων, η Γη βρίσκεται σε εκείνες τις θέσεις της τροχιάς της που ο άξονας έχει κλίση ως προς τον Ήλιο. Αυτά είναι:

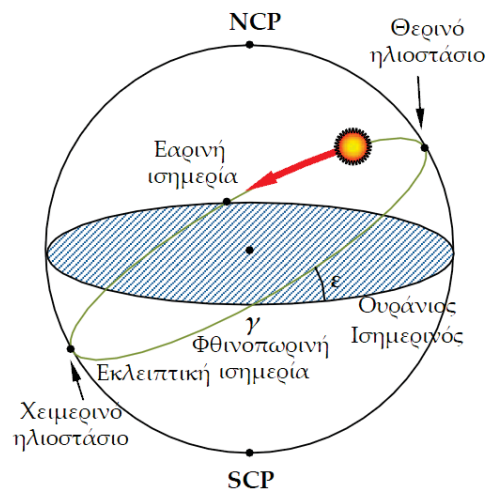


- το θερινό ηλιοστάσιο στις 21 Ιουνίου γιατί σηματοδοτεί την έναρξη του καλοκαιριού για το Β. Ημισφαίριο (και του χειμώνα για το Νότιο) και
- το χειμερινό στις 21 Δεκεμβρίου γιατί σηματοδοτεί την έναρξη του χειμώνα για το Β. Ημισφαίριο (και του καλοκαιριού για το Νότιο).

Το εαρινό (spring ή vernal equinox) και φθινοπωρινό ισημερινό (autumnal equinox) σημείο αντίστοιχα βρίσκονται στον ισημερινό και συνδέονται με τους ζωδιακούς αστερισμούς του Κριού ( $\Upsilon$ ) και του Ζυγού ( $\Omega$ ). Καθώς ο Ήλιος κινείται κατά μήκος της εκλειπτικής διασχίζει τον ουράνιο ισημερινό δύο φορές, πρώτα στο εαρινό ισημερινό σημείο ( $\Upsilon$ ) κινούμενος από το Νότο προς τον Βορρά περίπου στις 20-21 Μαρτίου στον αστερισμό του Κριού και στη συνέχεια στο φθινοπωρινό ισημερινό σημείο ( $\Omega$ ) κινούμενος από τον Βορρά προς τον Νότο στον αστερισμό του Ζυγού γύρω στις 22-23 Σεπτεμβρίου (σχήμα 2.17).

Όταν ο Ήλιος είναι στα ισημερινά σημεία υπάρχει ίση μέρα και νύχτα (12 ώρες) όπως μαρτυρεί και η ετυμολογία του όρου, ανατέλλει ακριβώς στην κατεύθυνση της ανατολής και δύει ακριβώς στην κατεύθυνση της δύσης. Σε αυτό διαφέρει από όλους τους υπόλοιπους ασέρες που πάντοτε ανατέλλουν στο ίδιο σημείο του ορίζοντα.

Το μέγιστο ύψος στο οποίο φτάνει ο Ήλιος στον ουρανό (από το βόρειο ημισφαίριο) σταδιακά αυξάνει από την εαρινή ισημερία και φτάνει στο μέγιστο στις 20-21 Ιουνίου - στο θερινό ηλιοστάσιο όπου ο Ήλιος «στέκεται» δηλαδή σταματά να κινείται προς Βορρά πριν να αρχίσει να κινείται πάλι πίσω προς τον ουράνιο ισημερινό. Ομοίως ο Ήλιος φτάνει στο ελάχιστο ύψος του στον ουρανό (από το βόρειο ημισφαίριο) στις 21-22 Δεκεμβρίου - στο χειμερινό ηλιοστάσιο. Αφού η εκλειπτική



Σχήμα 2.17: Η ετήσια πορεία του Ήλιου στον ουρανό.

σχηματίζει γωνία  $23.5^\circ$  σε σχέση με τον ουράνιο ισημερινό, το μέγιστο ή ελάχιστο ύψος στο οποίο φτάνει ο Ήλιος στον ουρανό (από το βόρειο ημισφαίριο) είναι  $23.5^\circ$ .

Κατά το θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου) η διεύθυνση του Ήλιου είναι αντίστοιχα πάνω και κάτω από τον ουράνιο ισημερινό δηλαδή ο Ήλιος είναι στο ζενίθ το μεσημέρι για τους παρατηρητές σε  $LAT = +23.5^\circ$  και  $LAT = -23.5^\circ$  αντίστοιχα και αυτά τα γεωγραφικά πλάτη καλούνται Τροπικός του Καρκίνου και Τροπικός του Αιγόκερου αντίστοιχα γιατί αυτοί είναι οι ζωδιακοί αστερισμοί που συνδέονται με το τμήμα της εκλειπτικής στο οποίο βρίσκεται ο Ήλιος τότε. Οι τόποι της Γης ανάμεσα σε αυτά τα δύο πλάτη βρίσκονται στην Τροπική ζώνη και μπορούν να δουν τον Ήλιο να περνά από το ζενίθ δύο ημέρες κάθε χρόνο.

Στο χειμερινό ηλιοστάσιο βλέπουμε το μικρότερο μέρος της ημερήσιας κίνησής του (μικρότερη ημέρα) και σηματοδοτεί την έναρξη της εποχής του χειμώνα για το Β. ημισφαίριο ενώ στο θερινό το μεγαλύτερο μέρος της ημερήσιας κίνησής του (μεγαλύτερη ημέρα) και σηματοδοτεί την έναρξη της εποχής του καλοκαιριού. Από την εμπειρία γνωρίζουμε ότι ο Ήλιος ανατέλλει βορειοανατολικά το καλοκαίρι και στα νοτιοανατολικά τον χειμώνα.

Με βάση τις παραπάνω θέσεις του Ήλιου μπορούμε να υπολογίσουμε τις ουρανογραφικές συντεταγμένες του μέσα στο χρόνο:

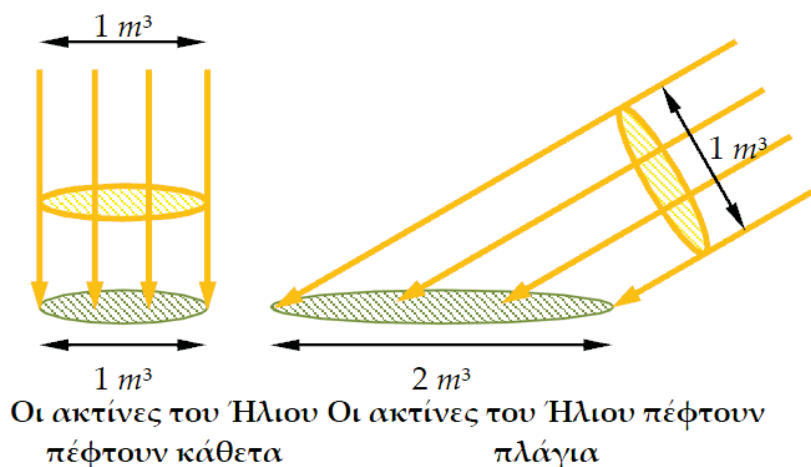
- 21 Μαρτίου (εαρινή ισημερία):  $\delta = 0^\circ$  (πάνω στον ουράνιο ισημερινό) και  $RA = 0h$ .
- 20-21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο):  $\delta = +23.5^\circ$  (πάνω από τον ουράνιο ισημερινό) και  $RA = 6h$ .
- 22 Σεπτεμβρίου (φθινοπωρινή ισημερία):  $\delta = 0^\circ$  (πάνω στον ουράνιο ισημερινό) και  $RA = 12h$ .
- 21-22 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο):  $\delta = -23.5^\circ$  (κάτω από τον ουράνιο ισημερινό) και  $RA = 18h$ .

### 2.4.3 Οι εποχές στα διάφορα πλάτη

Ο Ήλιος το καλοκαίρι βρίσκεται πάνω από τον ορίζοντα για περισσότερες ώρες απ' ό,τι το χειμώνα. Άρα οι ημέρες το καλοκαίρι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια απ' ό,τι το χειμώνα κι άρα το συνολικό ποσό της ενέργειας που δεχόμαστε είναι μεγαλύτερο.

Όταν η γωνία που σχηματίζουν οι ηλιακές ακτίνες με το έδαφος είναι μεγάλη, προσπίπτουν περισσότερες ακτίνες ανά μονάδα επιφάνειας στη Γη (είναι πιο συγκεντρωμένες) κι άρα περισσότερη ενέργεια (θερμότητα) ανά μονάδα επιφάνειας (τετραγωνικό μέτρο) απ' ό,τι σχηματίζουν μικρή γωνία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18.

Έτσι στις ισημερίες ο Ήλιος βρίσκεται στον ουράνιο ισημερινό δηλαδή στο ζενίθ για  $LAT = 0^\circ$  και σχεδόν όλοι στη Γη έχουν τον Ήλιο περιπου 12 ώρες πάνω και



Σχήμα 2.18: Η πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων στον ισημερινό και σε πλάτος  $63.5^\circ$ .

κάτω από τον ορίζοντα. Οι ηλιακές ακτίνες του Ήλιου πέφτουν στον ισημερινό κάθετα εκείνες τις ημέρες.

Γύρω στις 22 Ιουνίου για τους κατοίκους του Β. Ημισφαιρίου όχι μόνο οι ημέρες είναι μεγαλύτερες αλλά οι ακτίνες του Ήλιου πέφτουν με μικρή κλίση κι άρα προσπίπτει περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κι άρα λαμβάνουν περισσότερη θερμότητα. Για τους παρατηρητές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος  $90^\circ - 23.5^\circ = 66.5^\circ$  Βόρειο (Αρκτικός κύκλος) ο Ήλιος εμφανίζεται να τέμνει ακριβώς τον βόρειο ορίζοντα τα μεσάνυχτα, και όλοι οι τόποι βόρεια από αυτό το κύκλο βλέπουν τον Ήλιο πάνω από τον ορίζοντα όλο το 24ωρο. Αυτοί από έχουν συνεχώς ημέρα και το φαινόμενο είναι γνωστό ως **Ήλιος του μεσονυχτίου**. Από την άλλη, παρατηρητές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος  $66.5^\circ$  Νότιο (ισοδύναμα πάνω στον Ανταρκτικό Κύκλο) βλέπουν τον Ήλιο να τέμνει ακριβώς τον βόρειο ορίζοντα το μεσημέρι, και όλοι οι τόποι νότια από αυτό τον κύκλο δεν βλέπουν καθόλου τον Ήλιο όλο το 24ωρο. Αυτή είναι η λεγόμενη «πολική νύχτα». Κατά τις 21-22 Δεκεμβρίου τα φαινόμενα στα δύο ημισφαίρια αντιστρέφονται.

Γύρω στις 22 Δεκεμβρίου για τους κατοίκους του Β. Ημισφαιρίου όχι μόνο οι νύχτες είναι μεγαλύτερες αλλά οι ακτίνες του Ήλιου πέφτουν με μεγαλύτερη κλίση κι άρα προσπίπτει μικρότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κι άρα λαμβάνουν μικρότερη θερμότητα. Για τους κατοίκους πάνω από τον Αρκτικό κύκλο υπάρχει 24 ώρες σκοτάδι και γι αυτούς κάτω από τον Ανταρκτικό κύκλο 24 ώρες ημέρα.

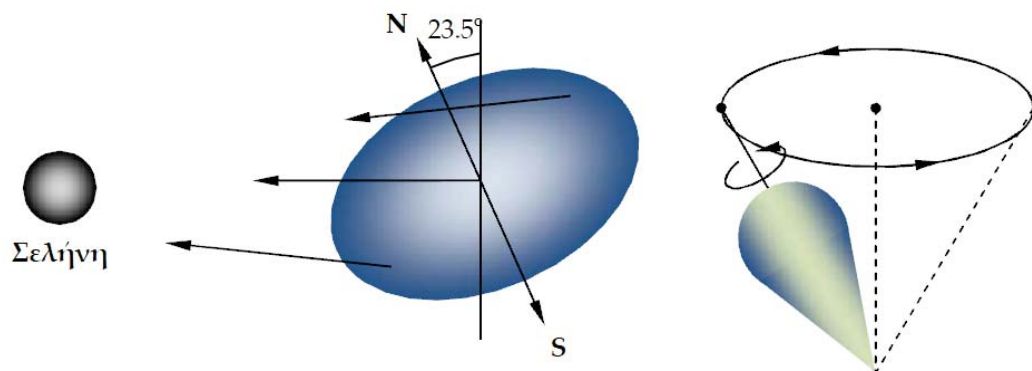
Θα πρέπει να σημειωθεί όπως φαίνεται κι από το σχήμα 2.16 ότι η Γη είναι πλησιέστερα στον Ήλιο στο Β. Ημισφαίριο το χειμώνα (στις 4 Ιανουαρίου)! Στην

πραγματικότητα βέβαια οι εποχές ξεκινούν με μια χρονική καθυστέρηση περίπου ενός μηνός λόγω της θερμότητας που αποθηκεύεται στους ωκεανούς.

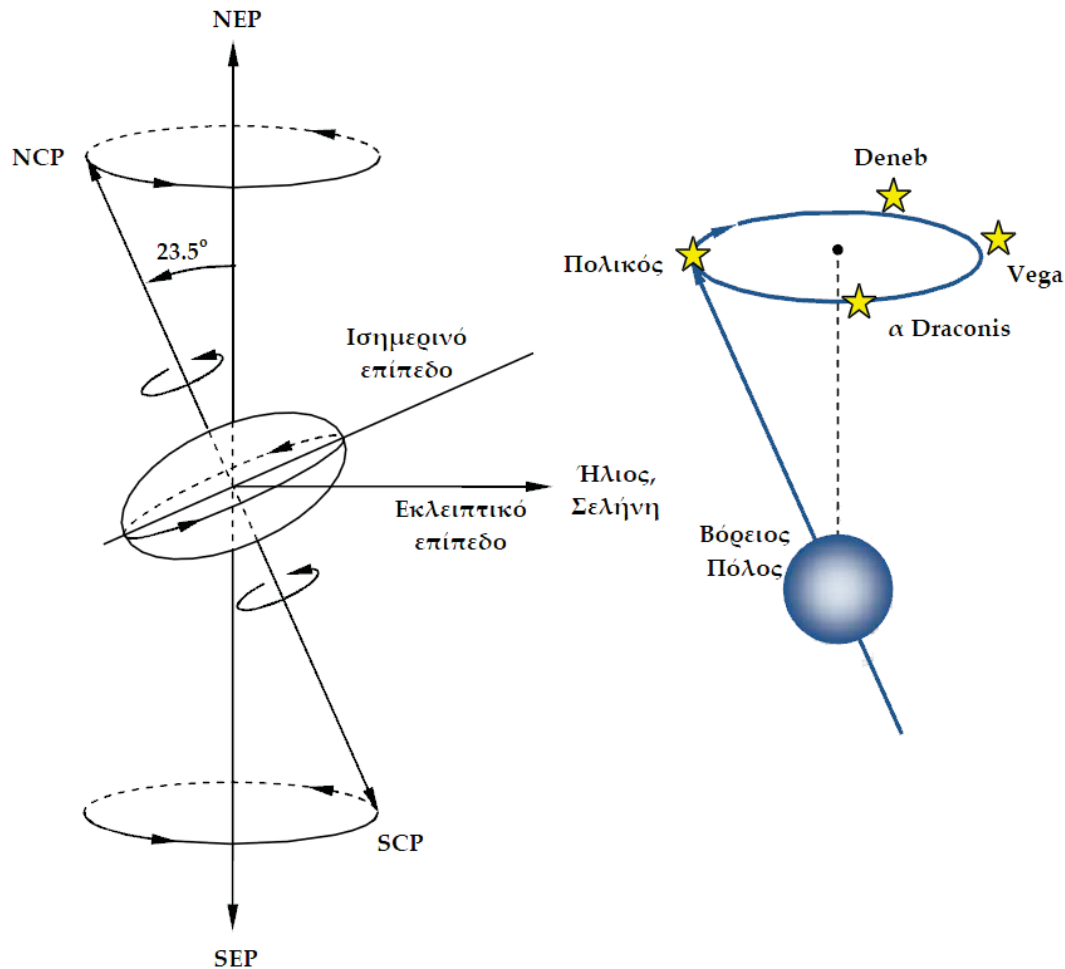
## 2.5 Μετάπτωση και κλόνιση του άξονα της Γης

Καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της είναι πλατύτερη στον ισημερινό κατά 1:298 δηλαδή ότι έχει ακτίνα 43 km μεγαλύτερη απ' ότι στους πόλους. Το πεπλατυσμένο σχήμα της Γης και η κλίση του άξονα περιστροφής της ως προς το επίπεδο της εκλειπτικής δημιουργούν συνθήκες ώστε οι ελκτικές δυνάμεις του Ήλιου και της Σελήνης να ασκούν μια ροπή στη Γη που τείνει να στρέψει τον άξονά της ώστε να γίνει κάθετος στο επίπεδο της τροχιάς της - η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση των δύο σωμάτων ως προς τη Γη (σχήμα 2.19). Επειδή όμως η Γη περιστρέφεται, αυτή η ροπή αναγκάζει τον άξονα περιστροφής της να μετατοπίζεται (μετάπτωση) δηλαδή να διαγράφει μία κωνική επιφάνεια γύρω από τον άξονα της εκλειπτικής, κίνηση όμοια με αυτή του άξονα μιας σβούρας (σχήμα 2.19).

Αυτή η ομαλή κυκλική κίνηση του άξονα περιστροφής είναι πολύ αργή και έχει περίοδο περίπου 26 000 έτη. Αυτό σημαίνει ότι οι ουράνιοι πόλοι κάνουν κύκλους γύρω από τους πόλους της εκλειπτικής κι άρα μεταβάλλεται ο χρόνος κατά τον οποίο ένας αστέρας θεωρείται πολικός. Προς το παρόν ο Βόρειος Πόλος δείχνει προς τον αστέρα  $\alpha$  της Μικρής Άρκτου που γι αυτό το λόγο λέγεται Πολικός αστέρας (Polaris) αλλά πριν από 14 000 έτη έδειχνε προς τον Vega, και σε 2200 έτη



Σχήμα 2.19: Οι σεληνιακές δυνάμεις και το αποτέλεσμά τους, η μετάπτωση του άξονα της Γης.



Σχήμα 2.20: Αλλαγή του πολικού αστέρα λόγω της μετάπτωσης του άξονα της Γης.

θα δείχνει προς τον  $\gamma$  του Κηφέως που απέχει  $3^\circ$  από τον Βόρειο Ουράνιο Πόλο (σχήμα 2.20).

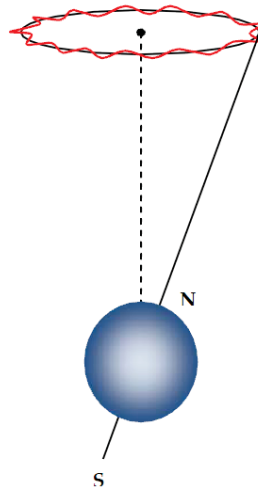
Είναι εμφανές ότι εάν η θέση των ουράνιων πόλων αλλάζει τότε θα αλλάζουν και οι αστέρες/αστερισμοί που είναι πάντα ορατοί για κάποιον παρατηρητή.

Επιπλέον επειδή όπως αναφέρθηκε, οι αστρονόμοι χρειάζονται συστήματα συντεταγμένων (RA, DEC) ευθυγραμμισμένα με τον άξονα περιστροφής της Γης, καθώς η Γη μεταπίπτει μετακινούν και το σύστημα συντεταγμένων ώστε να ακολουθεί τη μετάπτωσή της. Αυτό σημαίνει ότι οι συντεταγμένες θα μετατοπίζονται αργά ως προς το υπόβαθρο των αστέρων (περίπου 1 λεπτό τόξου/έτος κατά μήκος της εκλειπτικής). Επειδή δεν είναι εύκολη η αλλαγή των υπάρχοντων καταλόγων αστέρων και

γαλαξιών, αναφέρεται το έτος των συντεταγμένων ως ισημερία των συντεταγμένων. Για παράδειγμα υπάρχουν κατάλογοι με βάση τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής της Γης το 1950 που αναφέρονται ως (1950) ή (ισημερία 1950) και πενήντα χρόνια αργότερα χρησιμοποιώντας την διεύθυνση του άξονα περιστροφής το 2000 που αναφέρονται ως (2000) ή J2000 ή ισημερία 2000.

Η μετάπτωση του άξονα περιστροφής της Γης έχει μακροπρόθεσμη επίπτωση και στο κλίμα του πλανήτη. Προς το παρόν ο χειμώνας στο Β. Ημισφαίριο συμβαίνει όταν η Γη βρίσκεται πλησιέστερα στον Ήλιο στην ελλειπτική τροχιά της με τον άξονά της κεκλιμένο προς την αντίθετη διεύθυνση από τον Ήλιο γι αυτό και οι χειμώνες είναι συντομότεροι και θερμότεροι απ' ότι θα ήταν σε άλλη περίπτωση (ο Ήλιος είναι στη χαμηλότερη θέση του). Σε 13 000 έτη όταν ο άξονας της Γης θα δείχνει προς το Vega, οι χειμώνες θα συμβαίνουν όταν η Γη θα είναι στο πιο απομακρυσμένο σημείο της τροχιάς της κι άρα θα είναι ψυχρότεροι και με μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. (Αυτό πιθανόν μπορεί να σημαίνει την έναρξη μιας δεύτερης εποχής παγετώνων εάν έχουμε διαφύγει από το φαινόμενο του θερμοκηπίου!).

Η λόξωση όμως της εκλειπτικής δε μένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται πιο πολύπλοκα λόγω του συνδυασμού των βαρυτικών δυνάμεων από τον Ήλιο και τη Σελήνη και λόγω του μη συμμετρικού σχήματος και της εσωτερικής δομής της Γης, με αποτέλεσμα η τροχιά που διαγράφει ο άξονας της Γης κατά τη μετάπτωση να μην είναι κυκλική αλλά κυματοειδής. Η κυματοειδής κίνηση του άξονα της Γης γύρω από το μέσο κύκλο μετάπτωσης ονομάζεται κλόνιση (nutation) κι έχει περίοδο 18.6 έτη (σχήμα 2.21). Κάθε κλόνιση διαρκεί περίπου 18.6 έτη (κι άρα γίνονται πολύ περισσότερες μέσα στον κύκλο της μετάπτωσης που διαρκεί 26 000 έτη).



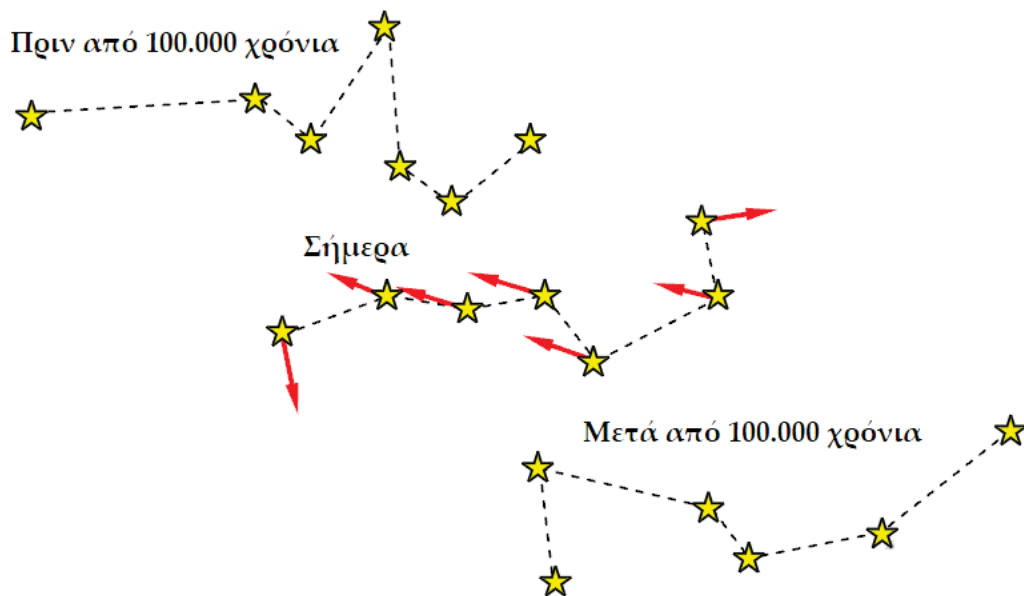
Σχήμα 2.21: Η κλόνιση του άξονα περιστροφής της Γης.

Ο ίδιος κύριος παράγοντας που επηρεάζει την περιστροφή της Γης, οι βαρυτικές δυνάμεις Ήλιου-Σελήνης προκαλούν επίσης παλίρροιες στους ωκεανούς και την ξηρά λόγω της μη στερεής κατάστασης της Γης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μετάπτωση περιστρέφει μόνο το σύστημα αναφοράς και δεν έχει κάποια επίπτωση στις σχετικές θέσεις των αστέρων. Εν τούτοις οι αστέρες δεν είναι ακίνητοι, κινούνται γύρω από το κέντρο του γαλαξία κι άρα για τους κοντινούς μπορούμε να υπολογίσουμε την κίνησή τους γύρω από τον Ήλιο. Η προβολή αυτής της κίνησης στην ουράνια σφαίρα λέγεται ίδια κίνηση και επιφέρει μεταβολές στην σχετική τους θέση όπως φαίνεται από την εμφάνιση της Μεγάλης Άρκτου λόγω της ίδιας κίνησης των αστέρων της, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22.

## 2.6 Κινήσεις των πλανητών

Οι πλανήτες κινούνται σε σχεδόν κυκλικές τροχιές γύρω από τον Ήλιο, γι αυτό και παρατηρούνται κοντά στο επίπεδο της εκλειπτικής και άρα η φαινόμενη διαδρομή τους γύρω από τη Γη γίνεται σχεδόν στο ίδιο επίπεδο. Η ζώνη πλάτους  $18^\circ$  με κέντρο την εκλειπτική που οριοθετεί τα όρια κίνησης των πλανητών ονομάζεται ζω-



Σχήμα 2.22: Η αλλαγή του σχήματος της Μεγάλης Άρκτου λόγω ίδιας κίνησης των αστέρων.

διαχός κύκλος γιατί χωρίζεται σε 12 τμήματα που παίρνουν το όνομά τους από τους αστερισμούς που κυριαρχούν σε καθένα από αυτά στην εκλειπτική. Εάν «σβήναμε» τον Ήλιο τότε ο αστερισμός που θα φαινόταν για τη δεδομένη στιγμή του χρόνου, καθορίζει και το «ζώδιο» εκείνης της χρονικής περιόδου<sup>5</sup>

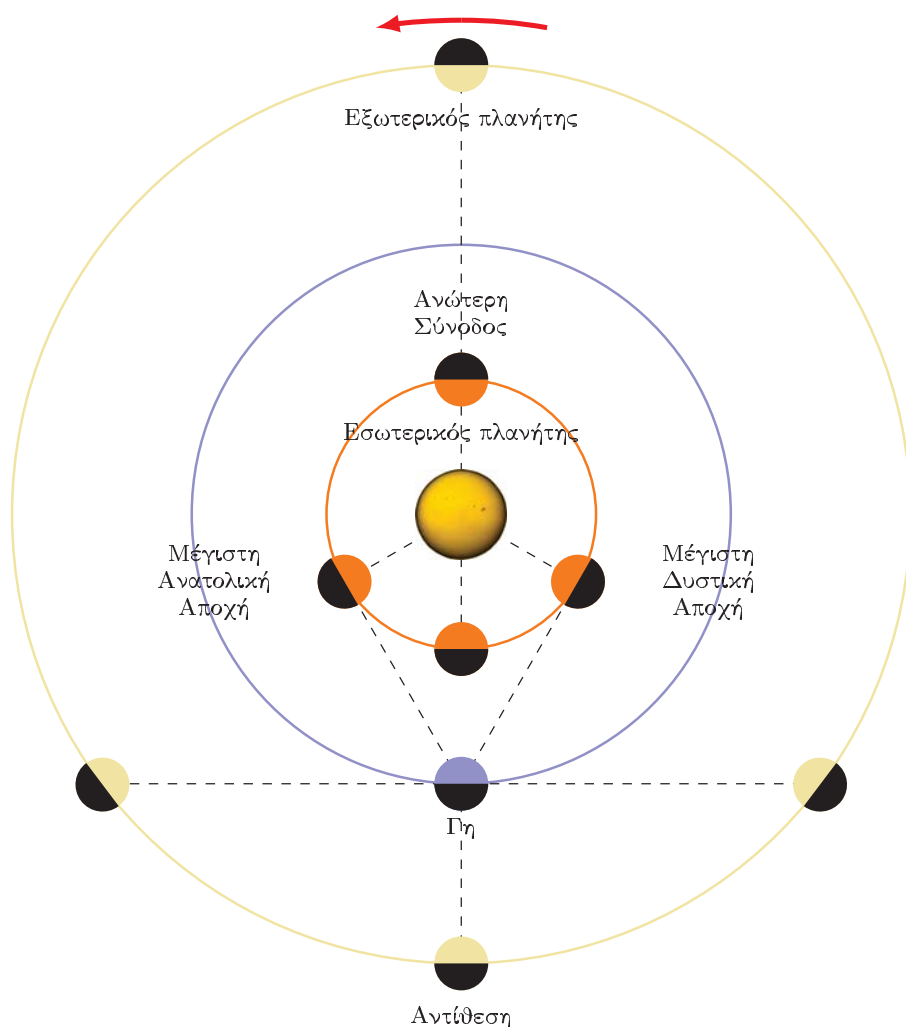
Οι πλανήτες ανάλογα με το αν η απόστασή τους από τον Ήλιο είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από της Γης διακρίνονται σε εξωτερικούς (Άρης, Δίας, Κρόνος, Ουρανός, Ποσειδώνας) και εσωτερικούς (Ερμης και Αφροδίτη). Η γωνία που σχηματίζουν με τη διεύθυνση του Ήλιου και της Γης (αποχή, elongation) μπορεί να είναι δυτική ή ανατολική ανάλογα με το εάν είναι δυτικά ή ανατολικά του Ήλιου για έναν παρατηρητή στη Γη (σχήμα 2.23). Η αποχή ενός εξωτερικού πλανήτη κυμαίνεται από 0° έως 180° ενώ για τον Ερμή μεταξύ 0° και 28° και 48° για την Αφροδίτη. Όταν οι πλανήτες βρίσκονται σε αποχή 0° (συγγραμμικοί με τη Γη και τον Ήλιο) λέμε ότι βρίσκονται σε συζυγία ή σύνοδο (conjunction), κατώτερη (inferior) όταν είναι μεταξύ Γης - Ηλίου και ανώτερη (superior) όταν βρίσκονται πίσω από τον Ήλιο. Μόνο οι εσωτερικοί μπορούν να έχουν κατώτερες συνόδους. Όταν οι πλανήτες βρίσκονται σε αποχή 180° (συγγραμμικοί με τη Γη και τον Ήλιο) βρίσκονται απέναντι από τον Ήλιο, βρίσκονται σε αντίθεση, δηλαδή στον ουρανό βρίσκονται στον μεσημβρινό του παρατηρητή κι έχουν την ευνοϊκότερη θέση παρατήρησης. Οι εσωτερικοί πλανήτες δε μπορεί να βρεθούν σε αντίθεση. Όταν η αποχή είναι 90° βρίσκονται σε τετραγωνισμό.

Οι πλανήτες ανακλούν το ηλιακό φως κι έτσι κατά την περιφορά ενός τους γύρω από τον Ήλιο μεταβάλλεται το ποσοστό της φωτισμένης επιφάνειας από τον Ήλιο. Για έναν παρατηρητή στη Γη αυτό το ποσοστό εξαρτάται από τη θέση του, γι αυτό και ο πλανήτης παρουσιάζει φάσεις όπως η Σελήνη και οι φάσεις που δείχνουν οι εξωτερικοί πλανήτες διαφέρουν πολύ από τις φάσεις των εσωτερικών. Η Νέα φάση συμβαίνει όταν βλέπουμε μόνο το σκοτεινό ημισφαίριο. Αυτό συμβαίνει μόνο στους εσωτερικούς και δεν μπορεί ποτέ να παρατηρηθεί στους εξωτερικούς. Η γεμάτη φάση (σε αντιστοιχία με την Πανσέληνο, βλ. §2.7) παρατηρείται όταν φαίνεται όλο το φωτισμένο ημισφαίριο και άρα όταν ο πλανήτης είναι σε αντίθεση, γι αυτό και παρατηρείται μόνο στους εξωτερικούς (οι εσωτερικοί στην ανώτερη σύνοδο έχουν γεμάτη φάση αλλά δεν φαίνεται λόγω της επικρατείας του Ήλιου). Οι εξωτερικοί πλανήτες δεν μπορούν να παρατηρηθούν σε φάση μηνίσκου, όταν λιγότερο από το ήμισυ του ημισφαιρίου τους φωτίζεται ενώ οι εσωτερικοί μπορούν. Παρατηρούνται πάντα σε φάση μεταξύ πρώτου τετάρτου και πλήρους φάσης όταν περισσότερο από το ήμισυ του ημισφαιρίου τους φωτίζεται, όπως και οι εσωτερικοί.

Όπως γνωρίζουμε από τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Kepler, όσο μακρύτερα βρίσκεται ένας πλανήτης από τον Ήλιο, τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται κι

<sup>5</sup>Ένα ωροσκόπιο είναι στην πράξη ένας χάρτης που δείχνει τη θέση των πλανητών, του Ήλιου και της Σελήνης σε σχέση με τους αστερισμούς του ζωδιακού κύκλου, σε μία δεδομένη χρονική στιγμή-τη γέννηση. Είναι προφανές ότι ένας τέτοιος χάρτης δεν μπορεί να έχει σχέση με τη διαμόρφωση του χαρακτήρα του ανθρώπου τη στιγμή της γέννησής του ή με τη συμπεριφορά του σε κάποια άλλη χρονική στιγμή.





Σχήμα 2.23: Οι σχετικές θέσεις των πλανητών και του Ήλιου.

άρα όταν η Γη και ένας πλανήτης κινούνται προς την ίδια πλευρά του Ήλιου και προσπερνά ο ένας τον άλλο (σχήμα 2.24), ο πλανήτης φαίνεται να κινείται ξανά στην ίδια διαδρομή από ανατολικά προς τα δυτικά για λίγο (ανάδρομη κίνηση, retrograde, κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού για έναν παρατηρητή που βλέπει προς τα κάτω προς το Βόρειο Πόλο) και μετά συνεχίζει την αρχική του πορεία από δυτικά προς τα ανατολικά (ορθή κίνηση, prograde, αντίθετα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού για έναν παρατηρητή που βλέπει προς τα κάτω προς το Βόρειο Πόλο). Για έναν παρατηρητή στην κινούμενη Γη αυτή η φαινόμενη κίνηση του πλανήτη αναστρέφεται δύο φορές. Όταν οι τροχιές της Γης και του πλανήτη είναι συνεπίπεδες, η κίνηση

του πλανήτη σχηματίζει ένα βρόχο. Η ερμηνεία της φαινόμενης αυτής κίνησης ήταν το πρόβλημα του Πτολεμαϊκού γεωκεντρικού συστήματος και δόθηκε τελικά από το ηλιοκεντρικό σύστημα.

Για τη μελέτη της κίνησης ενός πλανήτη απαιτείται ο προσδιορισμός της περιόδου του. Ο χρόνος που χρειάζεται ένας πλανήτης να επιστρέψει στην ίδια θέση στον ουρανό σε σχέση με τον Ήλιο για έναν παρατηρητή στη Γη ονομάζεται συνοδική περίοδος  $S$  (synodic), ενώ ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρώσει μία περιφορά γύρω από τον Ήλιο (τροχιακή περίοδος,  $P$ ) ονομάζεται αστρική περίοδος (sidereal) και καθορίζει το έτος του πλανήτη. Εάν η αστρική περίοδος της Γης είναι  $E$  και η Γη κινείται με ρυθμό ημέρα στην τροχιά της ενώ ο ρυθμός περιφοράς ενός εξωτερικού πλανήτη όπως φαίνεται από τον Ήλιο είναι  $360^\circ/P$ . Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.24 όταν η Γη συμπληρώσει μία τροχιά κινούμενη από τη θέση 1 στη θέση 2, έχει  $S - E$  ημέρες για να έρθει σε ξανά σε αντίθεση με έναν εξωτερικό πλανήτη (θέση 3). Σε αυτό το διάστημα ο πλανήτης έχει κινηθεί από τη θέση 1 στη θέση 3 κι άρα η Γη πρέπει να διαγράψει γωνία

$$\phi_e = \frac{S - E}{E} 360^\circ. \quad (2.8)$$

Στον ίδιο χρόνο που ο πλανήτης διαγράφει γωνία

$$\phi_p = \frac{S}{P} 360^\circ. \quad (2.9)$$

Οι δύο αυτές γωνίες πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους οπότε

$$\frac{S - E}{E} 360^\circ = \frac{S}{P} 360^\circ, \quad (2.10)$$

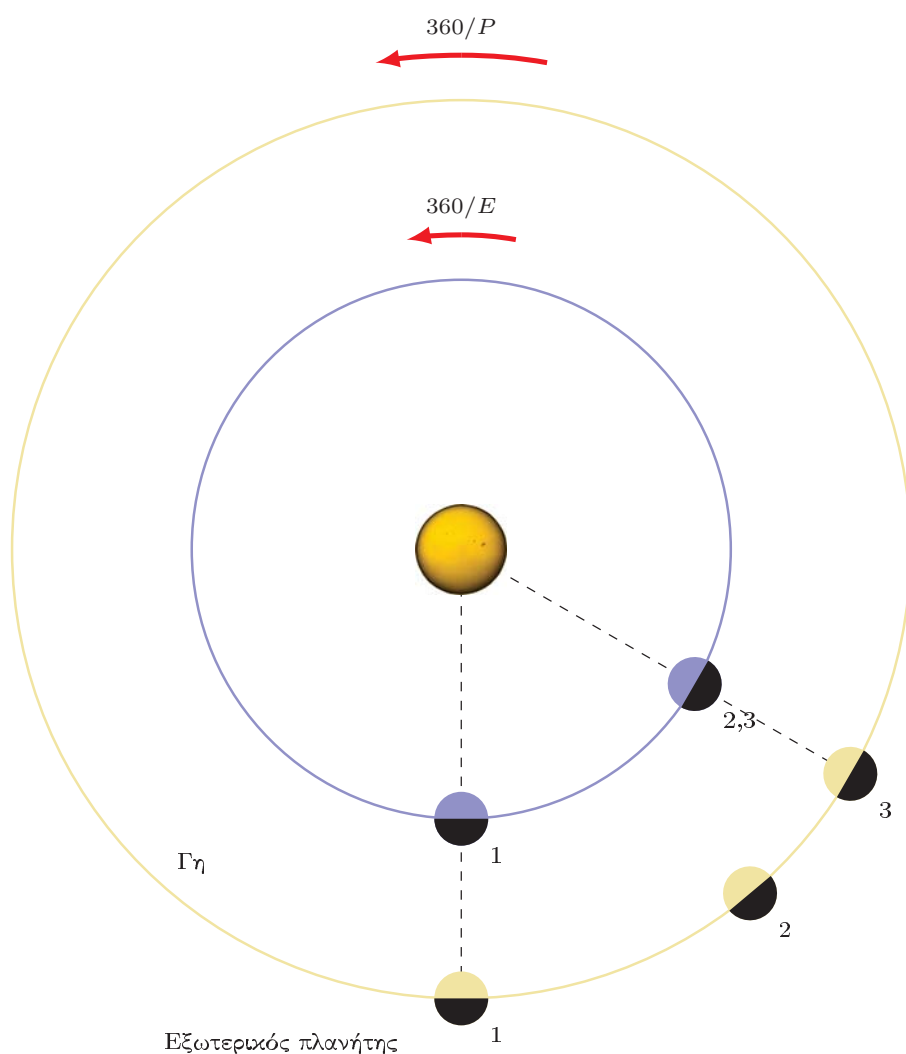
ή ισοδύναμα

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{E} - \frac{1}{P}. \quad (2.11)$$

Για έναν εσωτερικό πλανήτη, η Γη είναι εξωτερικός κι άρα η παραπάνω σχέση απλώς εναλλάσει τα  $E$  και  $P$  δηλαδή για έναν εσωτερικό πλανήτη

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{E} + \frac{1}{P}. \quad (2.12)$$

Συνεπώς, για την περίοδο των εσωτερικών πλανητών ισχύει η (2.12) ενώ για αυτή των εξωτερικών η (2.11). Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε για παράδειγμα το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών αντιθέσεων ενός (εξωτερικού) πλανήτη  $S$  και να καθορίσουμε το χρονικό διάστημα που διαρκεί το έτος  $P$  κάθε πλανήτη στο ηλιακό σύστημα.



Σχήμα 2.24: Υπολογισμός του έτους των πλανητών στο ηλιακό σύστημα.

## 2.7 Φάσεις της Σελήνης

Η Σελήνη κινείται γύρω από τη Γη μέσα σε 27.3 ημέρες και την ακολουθεί στην πορεία της γύρω από τον Ήλιο. Καθώς είναι το κοντινότερο στη Γη ουράνιο σώμα φαίνεται να κινείται ταχύτερα από κάθε άλλο. Κατά τη διάρκεια της περιφοράς της παρατηρούμε διαφορετικά μέρη του φωτιζόμενου από τον Ήλιο ημισφαιρίου της, ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει ο Ήλιος και η Σελήνη για έναν παρατηρητή

στη Γη<sup>6</sup>. Αυτές οι διαφορετικές διαδοχικές μορφές της Σελήνης ονομάζονται φάσεις (σχήμα 2.25).

Το σχήμα 2.25 αποτελεί μία σχηματική αναπαράσταση των σχετικών αυτών θέσεων με τη Γη στο κέντρο, την Σελήνη να περιστρέφεται γύρω της (εσωτερικός κύκλος), τον Ήλιο να βρίσκεται στα δεξιά (τα βελόνια δεξιά αντιστοιχούν στις ηλιακές ακτίνες) και τον εξωτερικό κύκλο να παριστάνει την εικόνα της Σελήνης όπως φαίνεται από τη Γη. Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.25 αλλά και από τον Πίνακα 2.2 όταν η Σελήνη βρίσκεται περίπου στην ευθεία ανάμεσα στη Γη και τον Ήλιο, ο φωτισμένος δίσκος της στο σύνολό του είναι στραμμένος προς τον Ήλιο και γι αυτό δεν φαίνεται από τη Γη (Νέα Σελήνη). Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής, ανατέλλει μαζί με τον Ήλιο. Στην επόμενη φάση μετά από 1 - 2 ημέρες φαίνεται από τη Γη προς τα δυτικά ένας φωτεινός μηνίσκος που μεγαλώνει κάθε μέρα και δύει όλο και αργότερα μέχρι να γίνει το Πρώτο Τέταρτο (μετά από 7 ημέρες και 9 ώρες από τη Νέα Σελήνη). Περίπου μετά από την πάροδο του ίδιου χρόνου, η Σελήνη βρίσκεται πάλι περίπου στην ευθεία Γης - Ηλίου αλλά στην αντίθετη διεύθυνση από τον Ήλιο και ο δίσκος της είναι πλήρης και φωτισμένος και έχουμε την Πανσέληνο. Κατά την πανσέληνο η Σελήνη ανατέλλει όταν ο Ήλιος δύει. Για το επόμενο διάστημα μέχρι τη Νέα Σελήνη, ο φωτισμένος δίσκος αρχίζει να μικραίνει με τις ακμές του μηνίσκου προς την ανατολή. Η Σελήνη σε αυτό το διάστημα ανατέλλει όλο πιο αργά μετά τη δύση του Ήλιου. Περίπου μετά από το ίδιο χρονικό διάστημα από την Πανσέληνο, (7 ημέρες και 9 ώρες) έχουμε τη φάση του Τελευταίου Τετάρτου της Σελήνης ή Τρίτο Τέταρτο οπότε ανατέλλει κατά το μεσονύκτιο. Όταν συμπληρωθούν από την πρώτη Νέα Σελήνη 29.53059 ημέρες τότε έρχεται πάλι στη θέση της φάσης μιας δεύτερης Νέας Σελήνης.

### 2.7.1 Η διεύθυνση της Σελήνης στον ουρανό σε κάθε φάση

Επειδή η θέση του Ήλιου στον ουρανό καθορίζει την τοπική ώρα, είναι δυνατό να αντιστοιχίσουμε τη συγκεκριμένη κάθε φορά φάση της Σελήνης και τη θέση της στον ουρανό, με την ώρα της ημέρας. Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.25 η νέα Σελήνη βρίσκεται πάντα στη διεύθυνση του Ήλιου, ο σεληνιακός μηνίσκος είναι πάντα κοντά στον Ήλιο και κατά τη διάρκεια του Πρώτου Τετάρτου, η Σελήνη βρίσκεται περίπου 90° ανατολικά του Ήλιου στον ουρανό και γι αυτό το λόγο η ανατολή της Σελήνης λαμβάνει χώρα περίπου το μεσημέρι. Αντίθετα, η ανατολή της Πανσελήνου συμβαίνει κατά τη δύση του Ήλιου και μεσουρανάει γύρω στα μεσάνυχτα όπως φαίνεται αναλυτικά από τον παρακάτω πίνακα, καθώς η Σελήνη βρίσκεται σε διαφορετική θέση στον ουρανό.

Η Σελήνη είναι ορατή και τη μέρα. Γιατί συμβαίνει όμως αυτό; Κατά το πρώτο

<sup>6</sup> Αν και η Σελήνη ανακλά μόνο 11% του ηλιακού φωτός λόγω των μη ανακλαστικών πετρωμάτων της, φαίνεται αρκετά λαμπρή.



Σχήμα 2.25: Οι φάσεις της Σελήνης.

τέταρτο η Σελήνη, η Γη και ο Ήλιος σχηματίζουν γωνία  $90^\circ$  κι άρα η Σελήνη απέχει από τον Ήλιο κατά  $90^\circ$ . Εάν θυμηθούμε ότι από τον ανατολικό στο δυτικό ορίζοντα είναι  $180^\circ$  τότε κατά το πρώτο τέταρτο, εάν ο Ήλιος δύει στο δυτικό ορίζοντα τότε η Σελήνη θα είναι στον μεσημβρινό. Όπως φαίνεται κι από τον Πίνακα 2.2, η Σελήνη του πρώτου τετάρτου ανατέλλει το μεσημέρι, διασχίζει το μεσημβρινό στο ηλιοβασίλεμα και δύει στη Δύση τα μεσάνυχτα. Αλλά η πανσέληνος σχηματίζει  $180^\circ$  από τον Ήλιο - δηλαδή βρίσκεται στην ακριβώς αντίθετη από τον Ήλιο διεύθυνση στον ουρανό - κι άρα ανατέλλει κατά το ηλιοβασίλεμα, βρίσκεται στο μεσημβρινό τα μεσάνυχτα και δύει κατά την ανατολή!

Μερικές φορές όταν η Σελήνη είναι στη φάση του λεπτού μηνίσκου (αύξοντα ή φθίνοντα) μπορούμε να δούμε τμήματα της πλευράς που δεν φωτίζεται από τον Ήλιο. Αυτό συμβαίνει γιατί για έναν παρατηρητή στη Σελήνη, η Γη φαίνεται σε πλήρη φάση, κι άρα είναι πολύ φωτεινή αφού ανακλά οκταπλάσια ποσότητα ηλιακού φωτός απ' ότι η Σελήνη. Αυτό το φως μπορεί να ανακλαστεί πάνω στο σκοτεινό ημισφαίριο της Σελήνης και να το φωτίσει. Το φαινόμενο είναι καλύτερα ορατό λίγες ημέρες μετά τη Νέα Σελήνη.

### 2.7.2 Το μέγεθος της Πανσελήνου

Πολλές φορές λίγο μετά την ανατολή ή πριν τη δύση, ο δίσκος της Σελήνης, κυρίως κοντά στη φάση της Πανσελήνου, φαίνεται πολύ μεγαλύτερος σε μέγεθος όταν είναι στον ορίζοντα από ότι όταν είναι στο ζενίθ. Στην πραγματικότητα δεν είναι μεγαλύτερος από  $0.5^\circ$  (ή είναι ελάχιστα αφού στο περίγειο έχει γωνιώδη διάμετρο

Πίνακας 2.2: Οι φάσεις της Σελήνης

	<b>Φάση:</b> Νέα Σελήνη <b>Ανατολή Σελήνης:</b> 6 π.μ. <b>Μεσουράνηση:</b> Μεσημέρι <b>Δύση Σελήνης:</b> 6 μ.μ.
	<b>Φάση:</b> Αύξουσα Φάση - Μηνίσκος <b>Ανατολή Σελήνης:</b> 9 π.μ. <b>Μεσουράνηση:</b> 3 π.μ. <b>Δύση Σελήνης:</b> 9 μ.μ.
	<b>Φάση:</b> Πρώτο τέταρτο <b>Ανατολή Σελήνης:</b> Μεσημέρι <b>Μεσουράνηση:</b> 6 μ.μ. <b>Δύση Σελήνης:</b> Μεσάνυχτα
	<b>Φάση:</b> Αύξουσα Φάση - Γεμάτη Ημισέληνος <b>Ανατολή Σελήνης:</b> 3 μ.μ. <b>Μεσουράνηση:</b> 9 μ.μ. <b>Δύση Σελήνης:</b> 3 π.μ.
	<b>Φάση:</b> Πανσέληνος <b>Ανατολή Σελήνης:</b> 6 μ.μ. <b>Μεσουράνηση:</b> Μεσάνυχτα <b>Δύση Σελήνης:</b> 6 π.μ.
	<b>Φάση:</b> Φθίνουσα Φάση - Γεμάτη Ημισέληνος <b>Ανατολή Σελήνης:</b> 9 μ.μ. <b>Μεσουράνηση:</b> 3 π.μ. <b>Δύση Σελήνης:</b> 9 π.μ.
	<b>Φάση:</b> Τρίτο Τέταρτο <b>Ανατολή Σελήνης:</b> Μεσάνυχτα <b>Μεσουράνηση:</b> 6 π.μ. <b>Δύση Σελήνης:</b> Μεσημέρι
	<b>Φάση:</b> Φθίνουσα Φάση - Μηνίσκος <b>Ανατολή Σελήνης:</b> 3 π.μ. <b>Μεσουράνηση:</b> 9 π.μ. <b>Δύση Σελήνης:</b> 3 μ.μ.

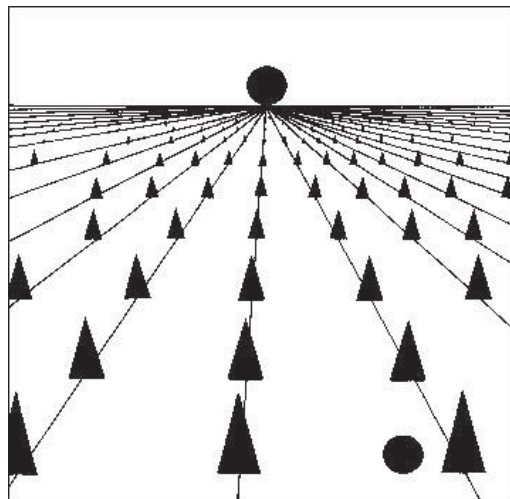
33' 31'' ενώ στο απόγειο μόνο 29' 22'') όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί από την φωτογράφισή του και η όλη αίσθηση συνήθως αποδίδεται σε οφθαλμαπάτη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26. Το φαινόμενο που παρατηρείται και με τον ηλιακό δίσκο προκύπτει όταν ένας δίσκος βρίσκεται χαμηλά και μπορούμε να τον συγκρίνουμε με αντικείμενα του υποβάθρου και επειδή στον ανθρώπινο εγκέφαλο φαίνεται πολύ

μακριά, συμπεραίνουμε ότι θα πρέπει να είναι μεγάλος ενώ όταν βρίσκεται ψηλά στο σκοτεινό υπόβαθρο του ουρανού, τον αντιλαμβανόμαστε ως μία μικρότερη πηγή φωτός (ψευδαίσθηση Ponzo). Η παραπάνω εξήγηση δεν είναι απολύτως αποδεκτή γιατί μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι την ίδια ψευδαίσθηση έχουμε κι όταν ο δίσκος είναι στο υπόβαθρο της θάλασσας όπου δεν υπάρχουν αντικείμενα προς σύγκριση.

### 2.7.3 Η περιστροφή της Σελήνης

Η Σελήνη περιστρέφεται όπως και η Γη γύρω από τον άξονά της, επειδή όμως βρίσκεται σε συντονισμό με την ιδιοπεριστροφή της Γης δηλαδή περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της στον ίδιο χρόνο που χρειάζεται για να συμπληρώσει μία πλήρη περιστροφή γύρω από τη Γη, παρατηρούμε πάντα την ίδια πλευρά της (το ίδιο ημισφαίριο).

Στα διαγράμματα του σχήματος 2.27 οι μεγάλοι κύκλοι παριστάνουν την τροχιά της Σελήνης γύρω από τη Γη και οι μικροί τη θέση της Σελήνης σε τέσσερις διαφορετικές θέσεις της τροχιάς της. Η διαγώνιος γραμμή παριστάνει τη θέση ενός κρατήρα της Σελήνης. Έστω ότι η Σελήνη δεν περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της όπως φαίνεται στο αριστερό διάγραμμα ( $A - B - C - D$ ) κι άρα στις διάφορες θέσεις της η Σελήνη μετατοπίζεται αλλά δεν περιστρέφεται. Ένας παρατηρητής στη Γη (στο μέσο του μεγάλου κύκλου) άλλοτε βλέπει τον κρατήρα προς την κοντινή προς αυτόν μεριά της Σελήνης ( $A, D$ ) και κάποιες φορές δεν τον βλέπει καθόλου



Σχήμα 2.26: Η ψευδαίσθηση του μεγαλύτερου σεληνιακού δίσκου (πηγή: ase.tufts.edu).

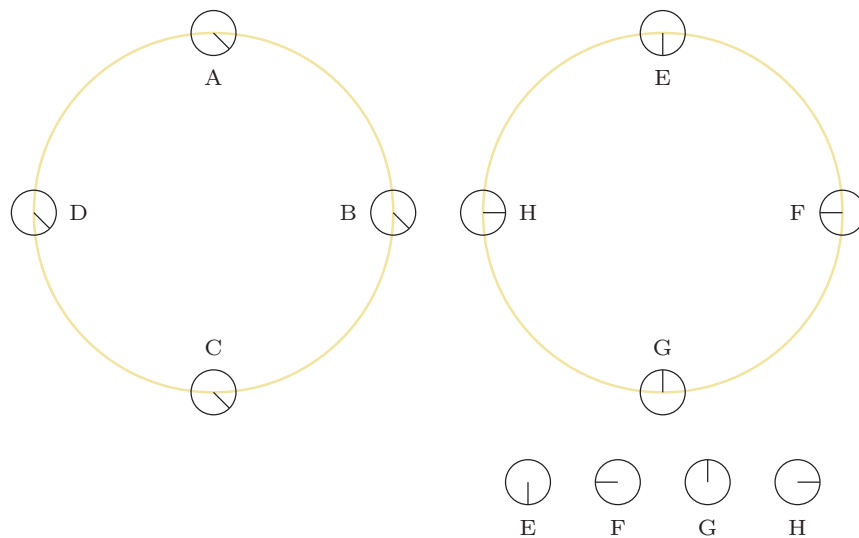
και βλέπει τα χαρακτηριστικά της άλλης πλευράς ( $B, C$ ).

Στο διάγραμμα στα δεξιά ( $E-F-G-H$ ), η Σελήνη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της (που είναι κάθετος στο επίπεδο της σελίδας) στο ίδιο χρονικό διάστημα που περιφέρεται γύρω από τη Γη για αυτό και ο παρατηρητής βλέπει τον κρατήρα από όλες τις θέσεις της Σελήνης (γιατί η διαγώνιος πάντα δείχνει προς τη Γη), άρα η Σελήνη δείχνει πάντα την ίδια πλευρά της προς τη Γη. Όταν έχει ολοκληρώσει μία περιφορά, τότε έχει περιστραφεί μία φορά γύρω από τον άξονά της, όπως βλέπουμε από τη μορφή της και στις τέσσερις θέσεις (που φαίνονται για λόγους έμφασης στο κάτω μέρος). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συγχρονισμός 1:1 περιστροφής - περιφοράς.

Αυτό σημαίνει ότι κατά το ήμισυ της τροχιάς της φωτίζεται πάντα το ένα ημισφαίριό της και κατά το υπόλοιπο ήμισυ το άλλο, δηλαδή σε κάθε θέση της το ένα ημισφαίριό της έχει «μέρα» και το άλλο «νύχτα», όπως στη Γη, με τη διαφορά ότι οι σεληνιακές ημέρες και νύχτες διαρκούν όσο 14.75 γήινες ημέρες.

Το φαινόμενο του συντονισμού των περιόδων περιστροφής ενός δορυφόρου και περιφοράς του γύρω από έναν πλανήτη είναι συχνό μέσα στο ηλιακό σύστημα και αποδίδεται στις παλιρροϊκές δυνάμεις του πλανήτη.

Άρα αφού το κάθε ημισφαίριο της Σελήνης ανακλά το ίδιο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (7%), θα ήταν ορθότερο να μιλάμε για μακρινή πλευρά και όχι για «σκοτεινή» γιατί το ήμισυ του σεληνιακού δίσκου φωτίζεται πάντα από τον Ήλιο (με εξαίρεση τις σεληνιακές εκλείψεις) αν και το φωτισμένο ήμισυ



Σχήμα 2.27: Η σύγχρονη περιστροφή της Σελήνης.



δεν είναι πάντα προς το μέρος της Γης. Η πιο απομακρυσμένη πλευρά δεν είναι πάντα η ίδια με τη σκοτεινή πλευρά. Κατά τη Πανσέληνο η μακρινή πλευρά είναι τελείως σκοτεινή ενώ κατά την Νέα Σελήνη η μακρινή πλευρά είναι πλήρως φωτισμένη (όπως φαίνεται από τον Ήλιο).

Εάν η τροχιά της Σελήνης ήταν τέλειος κύκλος, η περιστροφή θα ήταν σε τέλειο συντονισμό με την περιφορά της. Επειδή όμως είναι ελλειπτική και υπακούει στους νόμους του Kepler, κινείται ταχύτερα γύρω από τη Γη όταν είναι πλησιέστερα (στα 356 000 km) δηλαδή στο περιήγειο παρά στο πιο μακρινό σημείο (406 000 km) στο αφήγειο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της ελλειπτικής τροχιάς της γύρω από τη Γη να εκτελεί μία ταλάντωση στην διεύθυνση Ανατολής - Δύσης που ονομάζεται λίκνιση κατά γεωγραφικό μήκος (libration in longitude).

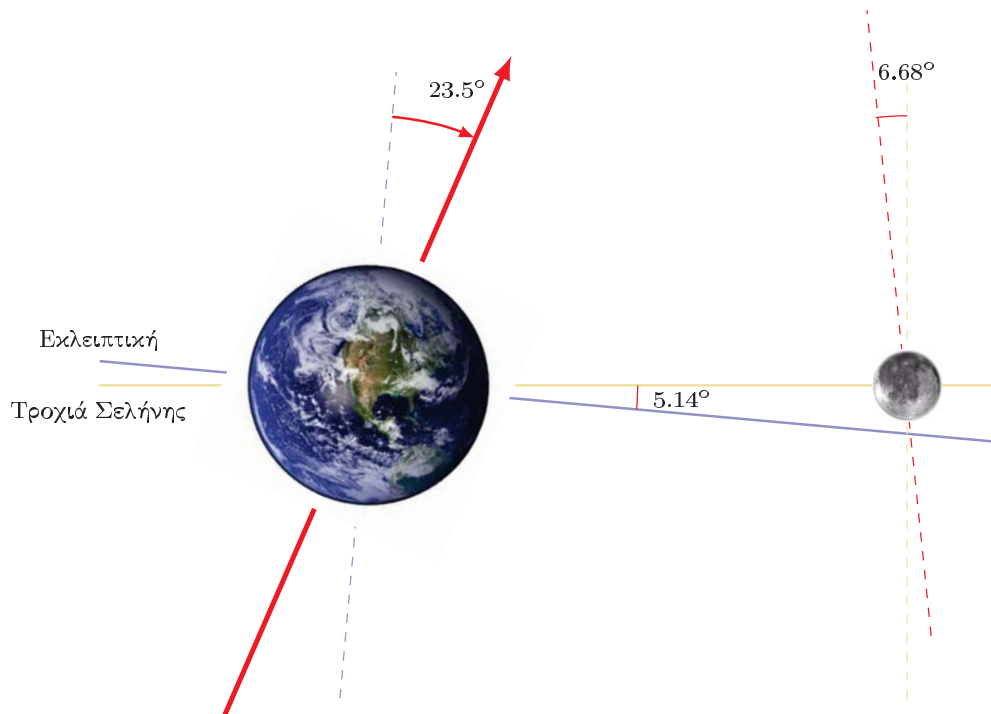
Αφού η περιστροφή της είναι σχεδόν σταθερή μπορούμε να δούμε ένα μικρό τμήμα γύρω από κάθε άκρο της. Επιπλέον επειδή ο άξονας περιστροφής είναι κεκλιμένος σε σχέση με το επίπεδο της τροχιάς της κατά  $7^\circ$ , μπορούμε να δούμε λίγο πιο πέρα από τους πόλους της κι έτσι η Σελήνη εμφανίζεται να κινείται πάνω και κάτω στη διεύθυνση Βορράς - Νότος όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα 2.28, κίνηση που είναι γνωστή ως λίκνιση κατά γεωγραφικό πλάτος (libration in latitude). Λόγω των παραπάνω κινήσεων μπορούμε να δούμε συνολικά το 59% της σεληνιακής επιφάνειας (αν και η παρατήρηση των περιοχών κοντά στα άκρα είναι δύσκολη και γίνεται με διαστημικά οχήματα).

Επιπλέον λόγω της κλίσης του άξονα, προβλέφτηκε η ύπαρξη πάγου σε μόνιμα σκιασμένους κρατήρες στους πόλους της Σελήνης που υπέδειξαν τα διαστημικά οχήματα Clementine και Lunar Prospector και επιβεβαίωσε το διαστημικό σκάφος LCROSS που έπεσε πάνω στον κρατήρα Cabeus στις 9 Οκτωβρίου του 2009 με ανάλυση του φωτός που διαθλάστηκε από τη σκόνη που προκάλεσε η σύγκρουση.

Μερικές φορές όταν η Σελήνη είναι στη φάση του λεπτού μηνίσκου (αύξοντα ή φθίνοντα) μπορούμε να δούμε τμήματα και του υπόλοιπου δίσκου που δεν φωτίζεται από τον Ήλιο. Αυτό συμβαίνει γιατί για έναν παρατηρητή στη Σελήνη, η Γη φαίνεται σε πλήρη φάση, κι άρα είναι πολύ φωτεινή αφού ανακλά οκταπλάσια ποσότητα ηλιακού φωτός απ' ότι η Σελήνη. Αυτό το φως μπορεί να ανακλαστεί πάνω στο σκοτεινό ημισφαίριο της Σελήνης και να το φωτίσει. Το φαινόμενο είναι καλύτερα ορατό λίγες ημέρες μετά τη Νέα Σελήνη.

#### 2.7.4 Η ταχύτητα περιφοράς της Σελήνης

Ο χρόνος περιφοράς της Σελήνης γύρω από τη Γη σε σχέση με τον Ήλιο δηλαδή ο χρόνος στον οποίο διαρκούν οι φάσεις της ονομάζεται συνοδικός μήνας (synodic) και διαρκεί 29.530589 μέρες (από τη μία Νέα Σελήνη στην άλλη) ενώ ο αντίστοιχος χρόνος σε σχέση με τους μακρινούς αστέρες ονομάζεται αστρικός (sidereal) και διαρκεί 27.3 ημέρες. Καθώς η Γη γυρίζει γύρω από τον Ήλιο και ενώ η Σελήνη ολοκληρώνει την τροχιά της, η Γη κινείται κατά το ένα δωδέκατο της πορείας της



Σχήμα 2.28: Η λίκνιση κατά γεωγραφικό μήκος για τη Σελήνη.

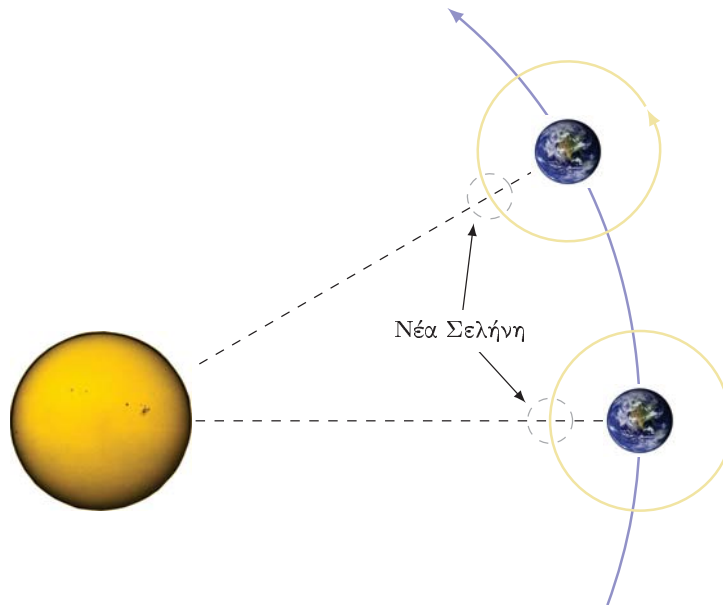
γύρω από τον Ήλιο. Εξαιτίας της πάρελξης των τροχιών της Γης και της Σελήνης, ο πραγματικός χρόνος μεταξύ των σεληνιακών μηνών μπορεί να ποικίλει από 29.27 στις 29.83 μέρες περίπου. Έτσι μία συνοδική (σεληνιακή) μέρα είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένας παρατηρητής στη Σελήνη για να δει τον Ήλιο ακριβώς στο ίδιο σημείο (σχήμα 2.29). Ο χρόνος αυτός στο σύνολο του μήνα, είναι ίδιος με το συνοδικό μήνα. Ο σεληνιακός δηλαδή μήνας είναι ανάλογος με την συνοδική περίοδο των πλανητών.

Η Σελήνη και ο Ήλιος κινούνται ανατολικά πάνω στην εκλειπτική, η Σελήνη σε έναν μήνα, ο Ήλιος σε έναν χρόνο. Άρα σε έναν μήνα (συνοδική περίοδος) κερδίζει δηλαδή προηγείται του Ηλίου κατά

$$\frac{360^\circ}{29.53 \text{ ημέρες}} = 12.19^\circ/\text{ημέρα}. \quad (2.13)$$

Αυτό σημαίνει ότι ανατέλλει (ή δύει) κατά μέσο όρο περίπου 50 λεπτά αργότερα, και αυτό γιατί

$$\Delta t = \left( \frac{24 \text{ ώρες}}{360^\circ} \right) \left( \frac{60 \text{ λεπτά}}{\text{ώρα}} \right) \left( \frac{12.9^\circ}{\text{ημέρα}} \right) = 48.8 \text{ λεπτά}/\text{ημέρα}. \quad (2.14)$$



Σχήμα 2.29: Ο αστρικός χρόνος περιφοράς της Σελήνης γύρω από τη Γη.

## 2.8 Εκλείψεις

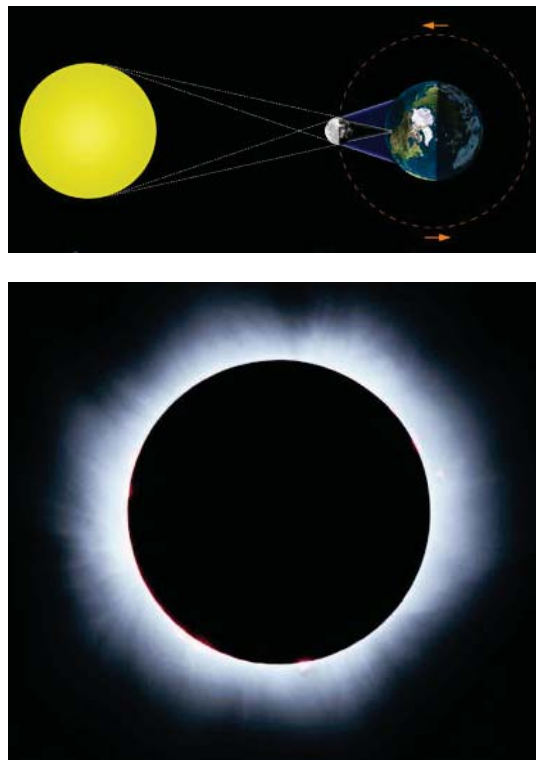
Μια ηλιακή έκλειψη συμβαίνει όταν η Σελήνη διέρχεται ανάμεσα στη Γη και τον Ήλιο (νέα Σελήνη), με αποτέλεσμα να τον αποκρύπτει, ρίχνοντας τη σκιά της από ένα μέρος της Γης. Από τη γεωμετρία του σχήματος 2.30 βλέπουμε ότι στις περιοχές που βρίσκονται στο σκοτεινό κεντρικό κώνο δηλαδή στη σκιά της Σελήνης (umbra) υπό ιδανικές συνθήκες, ο Ήλιος αποκρύπτεται τελείως (ολική έκλειψη), ενώ υπάρχουν και περιοχές που βρίσκονται στην μεγαλύτερη εξωτερική περιοχή δηλαδή στην παρασκιά (penumbra) όπου φαίνεται μέρος του ηλιακού δίσκου (μερική έκλειψη).

Αν και η διάμετρος του Ήλιου είναι περίπου 400 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της Σελήνης, επειδή ο Ήλιος βρίσκεται σε απόσταση 400 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τη Σελήνη για έναν παρατηρητή στη Γη, τα δύο αντικείμενα φαίνονται από τη Γη ότι έχουν σχεδόν την ίδια γωνιώδη διάμετρο (περίπου  $0.5^\circ$ ).

Όταν αποκόπτεται το ηλιακό φως, αναδεικνύονται τα εξωτερικά πολύ αραιά τμήματα του ηλίου που συγκροτούν το ηλιακό στέμμα. Καθώς οι αποστάσεις των τριών σωμάτων μεταβάλλονται, οι πιο ευνοϊκές συνθήκες προκύπτουν όταν η Σελήνη βρίσκεται στο περίγειο και η Γη στο αφήλιο οπότε η Σελήνη έχει το μέγιστο φαινόμενο μέγεθός της και ο Ήλιος το ελάχιστο, οπότε η μέγιστη δυνατή θεωρητικά ολική έκλειψη μπορεί να διαρκέσει μέχρι και 7 λεπτά και 31 δευτερόλεπτα. Λόγω όμως του συνδυασμού της περιστροφής της Γης και της τροχιακής κίνησης της

Σελήνης η κορυφή της σκιάς κινείται πολύ γρήγορα προς τα ανατολικά διασχίζοντας την επιφάνεια της Γης σχηματίζοντας ένα μονοπάτι έκλειψης καθώς η σκιά κινείται με μία μέση ταχύτητα των  $1700 \text{ km/h}$ , με συνέπεια η ολικότητα να παρατηρείται μόνο σε μια στενή περιοχή της Γης. Κάθε παρατηρητής έξω από αυτή αλλά μέσα στην παρασκιά βλέπει μια μερική έκλειψη. Επιπλέον πολύ συχνά συμβαίνουν και δαχτυλοειδείς εκλείψεις στις οποίες η Σελήνη φαίνεται πολύ μικρή για να καλύψει όλο τον ηλιακό δίσκο αφήνοντας ένα λεπτό δαχτυλίδι γύρω του όταν αποκόπτεται το φως του.

Μία έκλειψη Σελήνης συμβαίνει όταν η Σελήνη διέρχεται μέσα από τη σκιά της Γης η οποία και της αποκόπτεται το ηλιακό φως. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.31 μία έκλειψη Σελήνης συμβαίνει μόνο όταν βρίσκεται στην αντιδιαμετρική, σε σχέση με τον Ήλιο θέση, δηλαδή σε πανσέληνο. Όταν η Σελήνη βρεθεί στη σκιά της Γης (umbra) παρατηρείται ολική έκλειψη Σελήνης ενώ όταν βρεθεί μερικώς στη σκιά παρατηρείται μερική έκλειψη (σχήμα 2.31). Εάν βρεθεί στην παρασκιά (penumbra), το φως της αποσβένεται λίγο και η έκλειψη είναι δύσκολα παρατηρήσιμη από τη Γη.

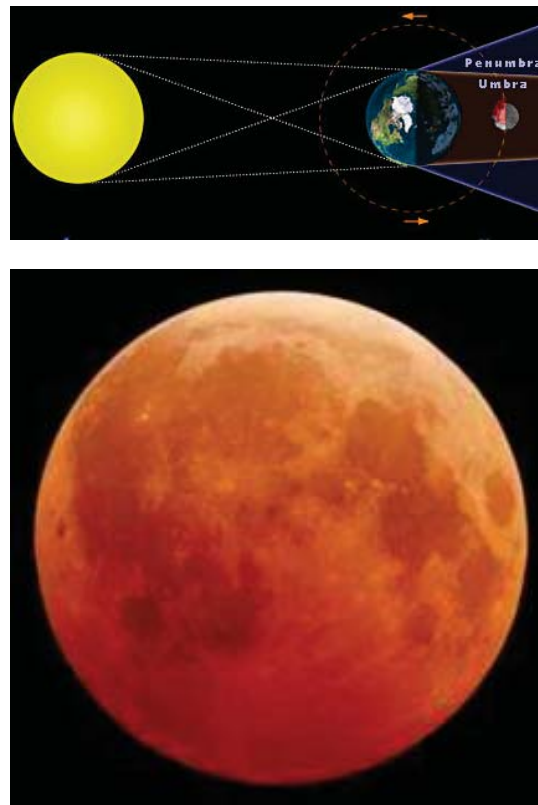


Σχήμα 2.30: Η γεωμετρία της ηλιακής έκλειψης και ο τρόπος με τον οποίο αποκαλύπτει το ηλιακό στέμμα.

Περίπου το 35% όλων των εκλείψεων συμβαίνουν στη σκιά, το 30% είναι μερικές και παρατηρούνται με γυμνό οφθαλμό και το υπόλοιπο 35% είναι ολικές και χαρακτηρίζονται από την ερυθρωπή απόχρωση που παίρνει η Σελήνη τελικά λόγω σκέδασης των υπολοίπων μηκών κύματος από την ατμόσφαιρα. Ο ακριβής χρωματισμός της εξαρτάται από την περιεκτικότητα της γήινης ατμόσφαιρας σε σκόνη και νέφη.

Ο παρατηρητής πάνω στη Σελήνη (αστροναύτης) θα έβλεπε τη Γη να σκιάζει τον Ήλιο και θα παρατηρούσε ένα λαμπρό ερυθρό δαχτυλίδι γύρω της καθώς θα παρατηρούσε τα ηλιοβασιλέματα και τις ανατολές ταυτόχρονα σε όλο τον κόσμο. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι εκλείψεις Σελήνης είναι ορατές σε όλο το ημισφαίριο της Γης, σε αντίθεση με αυτές του Ήλιου που είναι ορατές σε ένα μόλις μικρό κομμάτι του ημισφαιρίου. Επιπλέον η ταχύτητα με την οποία κινείται η Σελήνη μέσα στη σκιά της Γης είναι περίπου 1 km/sec, η διάρκεια της ολικής σεληνιακής έκλειψης (με τη Σελήνη να περάσει δηλαδή μέσα από το σκοτεινό μέρος της γήινης σκιάς) μπορεί να κρατήσει περίπου 1 ώρα και 42 λεπτά. Στο σύνολό του το φαινόμενο (μέχρι η Σελήνη να βγει εντελώς από τη σκιά, δηλαδή να περάσει και τη γήινη παρασκιά) διαρκεί περισσότερο χρόνο και γι αυτό το λόγο οι εκλείψεις Σελήνης ξεπερνούν σε διάρκεια τις ηλιακές.

Αφού η Σελήνη περιφέρεται γύρω από τη Γη κάθε 29.5 ημέρες (μία φορά το μήνα) γιατί δεν συμβαίνει έκλειψη σε κάθε Πανσέληνο ή σε κάθε Νέα Σελήνη; Επειδή το επίπεδο της τροχιάς της Σελήνης έχει κλίση  $5^\circ$  σε σχέση με το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, η Σελήνη συνήθως βρίσκεται πάνω ή κάτω από αυτό της Γης. Το επίπεδο όμως της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι αυτό στο οποίο σχηματίζεται η σκιά της Γης. Αυτό σημαίνει ότι η Πανσέληνος περνά συνήθως πάνω ή κάτω από τη σκιά της Γης οπότε δεν παρατηρείται έκλειψη. Εάν η τροχιά της Σελήνης γύρω από τη Γη ήταν απολύτως ευθυγραμμισμένη με την εκλειπτική θα συνέβαινε μία ηλιακή έκλειψη σε κάθε φάση Νέας Σελήνης γιατί τα τρία σώματα θα βρίσκονταν σε μία νοητή ευθεία γραμμή αλλά και μια σεληνιακή έκλειψη σε κάθε Πανσέληνο. Για να συμβεί μία έκλειψη θα πρέπει ο Ήλιος, η Γη και η Σελήνη να ευθυγραμμίζονται πλήρως δηλαδή τα σημεία τομής του επιπέδου της τροχιάς της Γης και της Σελήνης να βρίσκονται στην ίδια ευθεία με τον Ήλιο. Αυτή η ευθεία που ονομάζεται ευθεία των συνδέσμων (nodes) ενώνει το περίγειο και το απόγειο και περνά από τη Γη και η κίνησή της είναι αυτή που ρυθμίζει το είδος και τον αριθμό των εκλείψεων από το ένα έτος στο άλλο. Η περιστροφή της κίνησης της γραμμής των συνδέσμων κι άρα η σειρά των εκλείψεων επαναλαμβάνεται ακολουθώντας ένα κύκλο περίπου 18.6 ετών (Saros). Ο Ήλιος βρίσκεται στην ευθεία των συνδέσμων μόνο 2 φορές το χρόνο (γι αυτό υπάρχουν και δυο εποχές εκλείψεων κάθε χρόνο που απέχουν 6 μήνες) και αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρχουν 0, 1, 2 ή 3 εκλείψεις οποιουδήποτε είδους ανά έτος, ανάλογα με τη θέση της Σελήνης.



Σχήμα 2.31: Η γεωμετρία της σεληνιακής έκλειψης και η όψη της Σελήνης κατά τη διάρκειά της.

## 2.9 Ο Χρόνος στην Αστρονομία

Η διάρκεια που έχει η «ημέρα» ενός ουράνιου σώματος καθορίζεται από το χρονικό διάστημα ιδιοπεριστροφής του γύρω από τον άξονά του με σημείο αναφοράς τον Ήλιο. Η διάρκεια που έχει το «έτος» ενός ουράνιου σώματος καθορίζεται από το χρονικό διάστημα περιφοράς του γύρω από κάποιο άλλο. Για παράδειγμα το έτος της Γης διαρκεί 365 ημέρες ενώ το έτος του Πλούτωνα διαρκεί 248.6 γήινα έτη.

Οποιοδήποτε ουράνιο σώμα ή σημείο της ουράνιας σφαίρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως «σύστημα αναφοράς» μέτρησης του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών μεταβάσεων του από το μεσημβρινό του τόπου κι άρα για τον ορισμό της ημέρας. Γι αυτό διακρίνουμε:

- Τον αστρικό χρόνο που μετράται με βάση το εαρινό ισημερινό σημείο.
- Τον ηλιακό χρόνο που μετράται με βάση την τις διαβάσεις του Ήλιου.

- Τον τοπικό χρόνο που μετράται με βάση το γεωγραφικό μήκος ενός τόπου.
- Τον αληθή ηλιακό χρόνο που μετράται με βάση την πραγματική κάθε φορά φαινόμενη κίνηση του Ήλιου.
- Τον μέσο ηλιακό χρόνο που μετράται με βάση την κίνηση της Γης με σταθερή ταχύτητα γύρω από έναν υποθετικό μέσο Ήλιο και
- τον επίσημο χρόνο που μετράται με βάση της ωριαίες ατράκτους της Γης.

### 2.9.1 Αστρικός χρόνος

Η βάση του αστρονομικού χρόνου είναι η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της. Αυτή η κίνησή της, όπως είδαμε προκαλεί μία κανονική μεταβολή στις φαινόμενες θέσεις των αστερών δηλαδή κάνει στους αστέρες να ανατέλλουν στη Ανατολή, να διαγράφουν τοξοειδή πορεία στον ουρανό, να διασχίζουν τον μεσημβρινό (να μεσουρανούν) και τελικά να δύουν (εκτός από ορισμένες θέσεις όπως στους πόλους). Άρα θα μπορούσαμε να μετρήσουμε το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων από το μεσημβρινό με βάση την ωριαία γωνία κάποιου σταθερού σημείου στην ουράνια σφαίρα. Επειδή οι αστέρες είναι πολύ μακριά, η ετήσια κίνηση της Γης είναι αμελητέα σε σχέση με τη διεύθυνσή τους. Άρα ο χρόνος που χρειάζεται για μία πλήρη περιστροφή της Γης ( $360^\circ$ ) σε σχέση με τους αστέρες ονομάζεται αστρική (sidereal) ημέρα. Μία αστρική ημέρα είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών εμφανίσεων ενός μακρινού αστέρα στο ίδιο σημείο του μεσημβρινού της Γης. Αυτή η περιστροφή της Γης κατά  $360^\circ$  διαρκεί χρονικό διάστημα 24 αστρικών ωρών, μέσα στο οποίο η Γη περιστρέφεται με ρυθμό (γωνιακή ταχύτητα)  $15^\circ$  ανά ώρα (σχήμα 2.32).

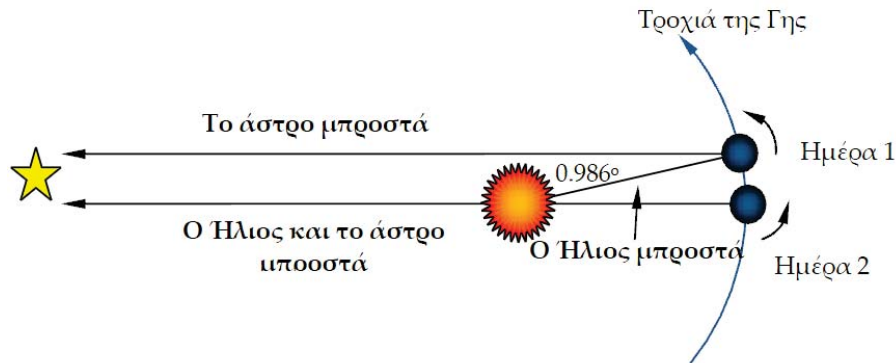
Ως σημείο αναφοράς του αστρικού χρόνου χρησιμοποιούμε την ωριαία γωνία της εαρινής ισημερίας (εαρινό σημείο του Κριού) HA ( $\Upsilon$ ) η οποία παίρνει την τιμή 0h όταν το εαρινό σημείο του Κριού διασχίζει τον μεσημβρινό του παρατηρητή και ονομάζεται τοπικός αστρικός χρόνος (Local Sidereal Time, LST) δηλαδή

$$\text{LST}(\Upsilon) = \text{HA}(\Upsilon). \quad (2.15)$$

Όπως φαίνεται και από την ετυμολογία της λέξης ο LST εξαρτάται από το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή. Επειδή η ωριαία γωνία HA του εαρινού σημείου ισούται με το άθροισμα της ορθής απόκλισης ενός αστέρα  $X$ ,  $\text{RA}(X)$  και της ωριαίας γωνίας του αστέρα  $\text{HA}(X)$  προκύπτει ότι

$$\text{LST} = \text{RA}(X) + \text{HA}(X). \quad (2.16)$$

Επειδή το  $X$  μπορεί να είναι οποιοδήποτε ουράνιο σώμα αστέρας, Ήλιος, Σελήνη, πλανήτης, διαστημικό όχημα, η παραπάνω σχέση είναι πολύ σημαντική γιατί γνωρίζοντας ότι η ωριαία γωνία ενός αστέρα είναι μηδενική όταν διασχίζει τον μεσημβρινό



Σχήμα 2.32: Ο αστρικός χρόνος.

του παρατηρητή, η ορθή αναφορά του δίνει τον τοπικό αστρικό χρόνο. Γενικά ο τοπικός αστρικός χρόνος συνδέεται με τον αστρικό χρόνο του Greenwich (GST ή ST0) δηλαδή τον τοπικό αστρικό χρόνο στο μεσημβρινό του Greenwich με τη σχέση

$$\text{LST} = \text{GST} + \text{LAT}. \quad (2.17)$$

όπου LAT είναι το γεωγραφικό μήκος.

## 2.9.2 Ηλιακός χρόνος

Στην καθημερινή ζωή μετράμε το χρόνο σε σχέση με δύο διαδοχικές μεταβάσεις του ήλιου από τον μεσημβρινό (αληθινός ηλιακός χρόνος). Επειδή η Γη κινείται σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο κάθε 365 ημέρες, σε μία ηλιακή ημέρα εκτελεί μία περιστροφή μεγαλύτερη από  $360^\circ$  κι άρα η φαινόμενη θέση του Ήλιου στον ουρανό αλλάζει.

Μία αληθής ηλιακή ημέρα είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών εμφανίσεων του Ήλιου στο ίδιο σημείο του μεσημβρινού. Ο φαινόμενος ηλιακός χρόνος (AST) βασίζεται στην ωριαία γωνία του Ήλιου (HAS) και όχι του εαρινού σημείου και παίρνει την τιμή μηδέν όταν ο Ήλιος διασχίζει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Μία ηλιακή ημέρα διαρκεί ακριβώς 24 ώρες και τη χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή. Λόγω της περιφοράς όμως της Γης μία ηλιακή ημέρα διαρκεί λίγο περισσότερο από την αστρική ημέρα γιατί μεταξύ των δύο διαδοχικών εμφανίσεων του Ήλιου στο ίδιο σημείο του μεσημβρινού πρέπει να περιστραφεί επιπλέον κατά  $0.986^\circ$ /ημέρα ( $360^\circ/365$  ημέρες) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.32. Άρα σε 24 ώρες, η Γη περιστρέφεται  $360.986^\circ$ .

Η παραπάνω κίνηση έχει σαν αποτέλεσμα η αστρική ημέρα να διαρκεί 23 ώρες και



56 λεπτά δηλαδή περίπου 4 πρώτα λεπτά χρόνου λιγότερο από μία ηλιακή ημέρα<sup>7</sup>. Άρα ενώ ένα ηλιακό έτος περιλαμβάνει περίπου 365.25 ηλιακές ημέρες, περιλαμβάνει περίπου 366.25 αστρικές ημέρες. Λόγω όμως της μη ισοταχούς κίνησης της Γης από μέρα σε ημέρα πάνω στην εκλειπτική (λόγω του 2<sup>ου</sup> νόμου του Kepler) στην πράξη ο ηλιακός χρόνος που μετράμε με τα ρολόγια μας είναι η κίνηση ενός φανταστικού Ήλιου (μέσος Ήλιος) που κινείται με σταθερή ταχύτητα στον ουράνιο ισημερινό και κάνει μία περιφορά σε χρονικό διάστημα ίσο με το πραγματικό. Η Μέση Ηλιακή ημέρα αρχίζει τα μεσάνυχτα δηλαδή τη στιγμή της κάτω μεσουράνησης του μέσου Ήλιου.

Όπως είδαμε, επειδή παρόμοιες κινήσεις κάνει η Σελήνη γύρω από τη Γη, λόγω της ετήσιας περιφοράς της Γης, η Σελήνη περιστρέφεται περισσότερο από 360° σε ένα συνοδικό σεληνιακό μήνα (synodic lunar month) δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων Νέας Σελήνης μέχρι να επανέλθει σε ευθεία γραμμή με τον Ήλιο.

### 2.9.3 Επίσημος ή πολιτικός χρόνος

Ο μέσος (ηλιακός) χρόνος που ακολουθούν τα ρολόγια μας σε κάθε τόπο ορίζουν και τον τοπικό χρόνο (civil time) του τόπου αυτού. Ο χρόνος αυτός είναι διαφορετικός αφού κατά την κίνησή του από Ανατολή σε Δύση, ο Μέσος Ήλιος θα περάσει πρώτα από τον μεσημβρινό της Ρόδου, μετά της Αθήνας, της Ρώμης κ.λ.π.. Με την ανάπτυξη των σιδηροδρόμων και των επικοινωνιών και για λόγους συντονισμού, ο μέσος ηλιακός χρόνος αντικαταστάθηκε από τον επίσημο χρόνο (πολιτικός χρόνος) ώστε όλοι οι τόποι μιας χώρας (ή το μεγαλύτερο μέρος της εάν είναι εκτεταμένη) να έχουν τον ίδιο χρόνο. Γι αυτό η επιφάνεια της Γης έχει διαιρεθεί σε 24 χρονικές ζώνες πλάτους περίπου 15° γεωγραφικού μήκους, οι οποίες μετρούνται σε ώρες (ωραίες άτρακτοι, 15°=1h ) μπροστά ή πίσω από το χρόνο της μηδενικής ατράκτου που είναι στο Greenwich και διχοτομείται από τον Πρώτο Μεσημβρινό (δηλαδή εκτείνεται 7.5° εκατέρωθεν του πρώτου μεσημβρινού). Ο επίσημος χρόνος της ατράκτου του Greenwich λέγεται παγκόσμιος χρόνος (Universal Time, UT). Σε κάθε άτρακτο οι άνθρωποι ρυθμίζουν τα ρολόγια τους σε μία συγκεκριμένη ώρα που συνήθως είναι ο μέσος τοπικός ηλιακός χρόνος του κεντρικού μεσημβρινού της ατράκτου. Η Ελλάδα βρίσκεται στη δεύτερη άτρακτο<sup>8</sup> ανατολικά του Greenwich και έχει ως κεντρικό μεσημβρινό αυτόν που περνά από την Κωνσταντινούπολη, έτσι ο επίσημος χρόνος Ελλάδας είναι κατά 2 ώρες μεγαλύτερος από τον Παγκόσμιο.

Πολλές χώρες κατά τους μήνες Μάρτιο έως Οκτώβριο επειδή ο Ήλιος ανατέλλει νωρίτερα κατά μέσο όρο, για εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιούν τη «θερινή ώρα» δηλαδή βάζουν τα ρολόγια μία ώρα μπροστά (αν και όχι ταυτόχρονα στην Ευρώπη και Αμερική και στις πόλεις της Αμερικής). Ο επίσημος χρόνος Ελλάδας

<sup>7</sup>Οι αστρονομικές παρατηρήσεις γίνονται με βάση την αστρική ώρα.

<sup>8</sup>Όπως και η Δαμασκός, το Ελσίνκι, το Κάιρο, το Βουκουρέστι, η Σόφια, η Ιερουσαλήμ, το Κίεβο κ.λ.π..

με τη θερινή ώρα είναι  $UT+3h$ .

Η Γη χρειάζεται περίπου 365.25 ημέρες για την περιφορά της γύρω από τον Ήλιο και προκειμένου να διατηρήσουμε το ημερολόγιο σύμφωνα με τις εποχές, προσθέτουμε μία διορθωτική ημέρα (leap day) κάθε τέσσερα έτη.

#### 2.9.4 Παγκόσμιος χρόνος (Universal Time, UT)

Ο παγκόσμιος χρόνος (Universal Time, UT) βασίζεται στην κίνηση του Ήλιου (στην περιστροφή της Γης) δηλαδή έχει 24 ώρες σε μία ημέρα αλλά καθορίζεται με βάση τον μέσο ηλιακό χρόνο (Greenwich mean time, GMT) στο μεσημβρινό του Greenwich (μήκος  $0^\circ$ ) στην πόλη Greenwich της Αγγλίας, και δεν ακολουθεί τη θερινή ώρα. Λόγω της περιστροφής της Γης προς την Ανατολή όταν είναι μεσημβρία (μεσημέρι) στο Greenwich δηλαδή όταν ο Ήλιος μεσουρανεύει, θα είναι προ μεσημβρίας για τις περιοχές δυτικά του Greenwich και μετά μεσημβρίας για τις περιοχές ανατολικά όπως φαίνεται στο σχήμα 2.33 για έναν παρατηρητή που κοιτά από ψηλά προς τα κάτω προς το Βόρειο Πόλο (στο σχήμα έχει παραληφθεί για λόγους απλοποίησης η κλίση του άξονα της Γης)

Ο τοπικός μέσος ηλιακός χρόνος (Local Mean Solar Time, LMT) ενός τόπου δίνεται από την εξίσωση

$$LMT - (GMT \times 15^\circ) = LONG. \quad (2.18)$$

όπου LONG είναι το γεωγραφικό μήκος (το γεωγραφικό μήκος ανατολικά έχει θετικό πρόσημο)<sup>9</sup>. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά ο LMT είναι διαφορετικός από τον πολιτικό χρόνο (επίσημο χρόνο) ενός τόπου αφού ο πολιτικός χρόνος είναι ο ίδιος για όλες τις θέσεις που ανήκουν στην ίδια άτρακτο (ζώνη) και είναι ο LMT για το επίσημο γεωγραφικό μήκος της ζώνης.

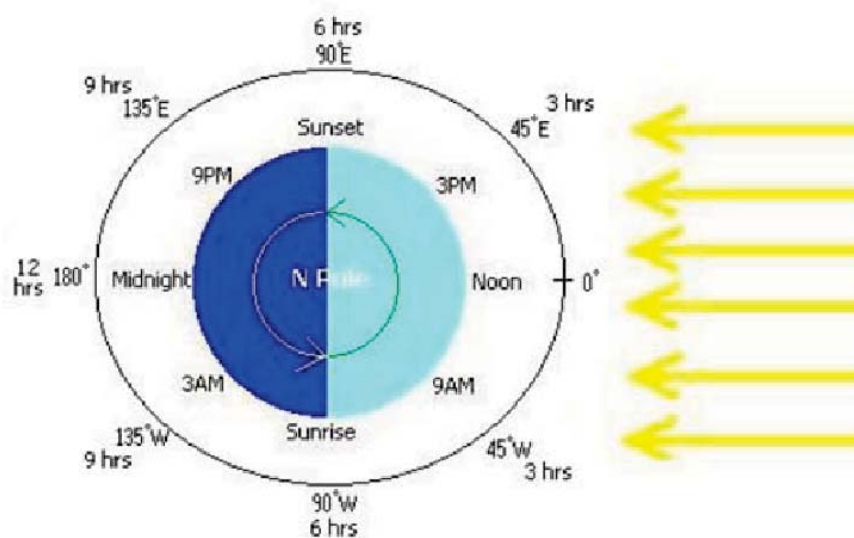
Επειδή ο παγκόσμιος χρόνος είναι ανεξάρτητος της θέσης του παρατηρητή, χρησιμοποιείται από τους αστρονόμους σε όλο τον κόσμο, δηλαδή τα αστρονομικά γεγονότα υπολογίζονται και αναφέρονται σε σχέση με τον UT που συμβαίνουν. Για παράδειγμα εάν ένας μεταβλητός αστέρας πρόκειται να μπει στη φάση της έκλειψής του στις 5:35 UT, τότε οι παρατηρητές σε όλο τον κόσμο γνωρίζουν πού να τον παρατηρήσουν αρκεί να κάνουν τις ανάλογες διορθώσεις.

**Παράδειγμα 2.6:** Πού βρίσκεται ένας τόπος που έχει διαφορά ώρας 2 ώρες με το Greenwich;

Μπορεί να βρίσκεται  $30^\circ$  ανατολικά ή  $30^\circ$  δυτικά του Greenwich.



<sup>9</sup>Σύμφωνα με τη Διεθνή Αστρονομική ένωση (International Astronomical Union, IAU) το 1982.



Σχήμα 2.33: Αναπαράσταση του επίσημου χρόνου όταν στο Greenwich είναι μεσημέρι.

### 2.9.5 Είδη χρόνων

Σε περιπτώσεις που θέλουμε να λάβουμε υπόψη περισσότερες λεπτομέρειες της κίνησης της Γης μπορούμε να κάνουμε κάποιες διορθώσεις, όπως για παράδειγμα λόγω της μετάπτωσης. Επειδή η μάζα της Γης έχει σφαιρική συμμετρία (εξογκωμένη στον ισημερινό) η βαρυτική έλξη του Ήλιου και της Σελήνης αναγκάζει τον άξονα της Γης να εκτελεί μεταπτωτική κίνηση όπως μία σβούρα. Το αποτέλεσμα είναι το σημείο της εαρινής ισημερίας να κινείται δυτικά με ρυθμό περίπου 50 δευτερόλεπτα της μούρας ανά έτος (πλήρης περιστροφή σε 26 000 έτη) κι άρα αν και η «αληθινή» αστρική περιστροφή της Γης διαρκεί 86 164 100 δευτερόλεπτα, η περιστροφή σε σχέση με το εαρινό σημείο (κι άρα σε σχέση με την ορθή αναφορά  $RA=0$ ) να διαρκεί 86 164 092 δευτερόλεπτα.

#### Παγκόσμιος χρόνος (UT1)

Αν και στην ουσία είναι ο τοπικός μέσος χρόνος του Greenwich (GMT), λόγω της δυσκολίας επακριβών μετρήσεων των κινήσεων του Ήλιου, η μέτρηση του βασίζεται στη μέτρηση της γωνίας περιστροφής της Γης σε σχέση με απομακρυσμένα κβάζαρος (σε σχέση με το Διεθνές Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς, International Celestial Reference Frame, ICRF).

### Χρόνος των εφημερίδων (Ephemeris Time, ET)

Την περίοδο 1952-1984, οι υπολογισμοί προσδιορισμού των τροχιακών κινήσεων των πλανητών προκειμένου να σχεδιαστούν οι τροχιές των διαστημικών οχημάτων, δημιούργησε την ανάγκη εύρεσης χρόνου ως ανεξάρτητης μεταβλητής στο σύστημα των εξισώσεων κίνησης του ηλιακού συστήματος. Αυτός είναι ο χρόνος των εφημερίδων των αστρονομικών σωμάτων που ορίζεται ως ο παγκόσμιος χρόνος (UT) του 1900 (χωρίς εμβόλιμα δευτερόλεπτα).

### Γήινος δυναμικός χρόνος (terrestrial dynamical time, TDE)

Ο σύγχρονος επίσημος χρόνος έχει ως μονάδα μέτρησης το δευτερόλεπτο του Διεθνούς Συστήματος μονάδων όπως ορίζεται με βάση το ατομικό ρολόι του καϊσίου. Στην ουσία το δευτερόλεπτο ισοδυναμεί με 9192631770 περιόδους μίας συγκεκριμένης μετάβασης στη μικροκυματική περιοχή του ισοτόπου του στοιχείου  $^{133}\text{Cs}$  (καϊσίου). Ο TDE χρησιμοποιείται για μετρήσεις χρόνου από την επιφάνεια της Γης (σχεδιασμό τροχιάς διαστημικών οχημάτων, μελέτες τροχιάς μελών ηλιακού συστήματος).

### Συντονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος (Coordinated Universal Time, UTC)

Ο Συντονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος διαφέρει από τον UT1 μέχρι 0.9 sec. Αυτό γίνεται με την προσθήκη ενός διορθωτικού δευτερολέπτου (leap second) δύο φορές το χρόνο (στις 30 Ιουνίου και στις 31 Δεκεμβρίου). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ ο TDE βασίζεται στη φυσική, ο UT1 βασίζεται στην πραγματική παρατήρηση του ρυθμού περιστροφής της Γης.

### Ιουλιανή ημερομηνία (Julian Date, JD)

Επειδή ο τοπικός χρόνος περιλαμβάνει μήνες με διαφορετικό αριθμό ημερών και δίσεκτα έτη, για υπολογισμό γεγονότων στην αστρονομία (για παράδειγμα η περίοδος μεταβλητών αστερών) που διαρκούν πάνω από μία ή δύο ημέρες, χρησιμοποιούμε το σύστημα της Ιουλιανής ημερομηνίας (Julian Date, JD) που προσδιορίζεται με βάση τον αριθμό των ημερών από τη μεσημβρία της 1<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 4713 π.Χ. (UT). Η σημασία της Ιουλιανής ημερομηνίας δεν έγκειται στον καθορισμό του σημείου αφετηρίας μέτρησης αλλά στο γεγονός ότι όλα τα γνωστά καταγεγραμμένα ιστορικά γεγονότα έχουν θετική Ιουλιανή ημερομηνία (το όνομα της προέρχεται από τον Julius Scaliger, πατέρα του Joseph Justus Scalinger (1540-1609) που εισήγαγε το σύστημα και όχι από τον Ιούλιο Καίσαρα). Στην πράξη η ακριβής περιγραφή των γεγονότων απαιτεί την μέτρηση με βάση το διεθνή χρόνο (χρόνος Greenwich). Για παράδειγμα η μεσημβρία σε UT ίσο με 12/3/02 ισοδυναμεί με ιουλιανή ημερομηνία JD=2 452 346.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

# Η φύση του φωτός

---

Το φως ταξιδεύει γρηγορότερα από τον ήχο.

Γι αυτό μερικοί άνθρωποι φαίνονται λαμπεροί μέχρι να αρχίσουν να μιλάνε.

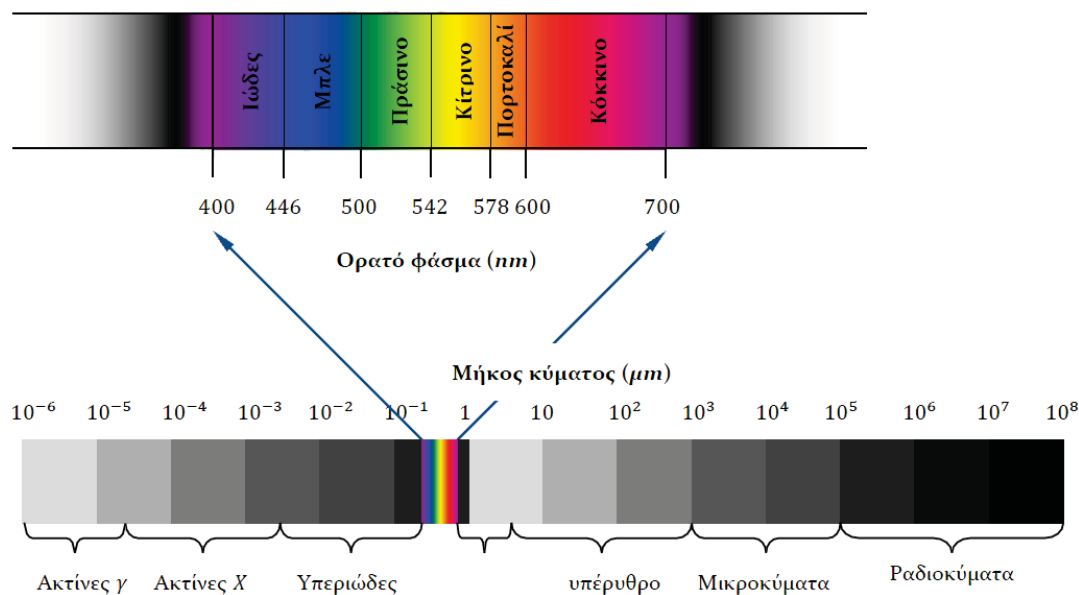
### 3.1 Το φως

Το φως είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που όταν προσπίπτει πάνω σε φορτισμένα σωματίδια τα επιταχύνει και ανάστροφα εκπέμπεται από την επιτάχυνση των φορτισμένων σωματιδίων. Ο Einstein έδειξε ότι το φως εκπέμπεται κατά διακριτές ποσότητες ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια, το καθένα από τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μικρό κύμα που διαδίδεται στο χώρο. Όπως κάθε κύμα, τα φωτεινά κύματα χαρακτηρίζονται από μήκος κύματος ( $\lambda$ ), συχνότητα ( $\nu$ ), ταχύτητα ( $u$ ) και ενέργεια ( $E$ ). Τα φωτεινά κύματα μπορεί να έχουν διαφορετικά μήκη κύματος, διαδίδονται όμως όλα στο κενό με την ίδια ταχύτητα που ονομάζεται ταχύτητα του φωτός ( $c$ ). Η ενέργεια κάθε φωτονίου ( $E$ ) συνδέεται με το εκπεμπόμενο μήκος κύματος μέσω της σχέσης

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3.1)$$

όπου  $h = 6.64 \times 10^{-34} J \cdot sec$  η σταθερά του Planck. Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι τα φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος μεταφέρουν μικρότερη ενέργεια από αυτά του μεγαλύτερου μήκους κύματος.

Το σύνολο των μηκών κύματος αποτελεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (σχήμα 3.1) το οποίο περιλαμβάνει: τις ακτίνες  $\gamma$  ( $10^{-12} m$ ), τις ακτίνες  $X$  ( $10^{-10} m$ ), το υπεριώδες μέρος ( $10^{-7} m$ ), το ορατό μέρος ( $400-700 \times 10^{-9} m$ ) που υποδιαιρείται σε ιώδες, κυανό, πράσινο, κίτρινο και ερυθρό, το υπέρυθρο ( $10^{-4} m$ ), τα μικροκύματα ( $10^{-3} m$ ) και τα ραδιοφωνικά κύματα ( $0.1-10^4 m$ ).

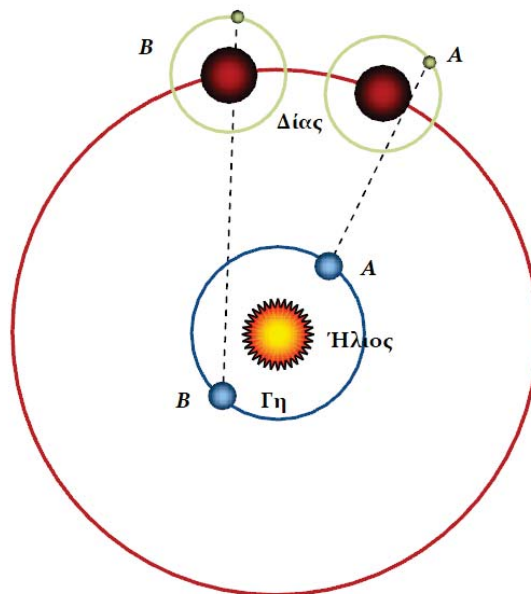


Σχήμα 3.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

## 3.2 Υπολογισμός της ταχύτητας του φωτός

Ο πρώτος αξιόπιστος υπολογισμός της ταχύτητας του φωτός έγινε με βάση ένα αστρονομικό φαινόμενο το από τον Δανό Ole Roemer ο οποίος σκέφτηκε να χρησιμοποιήσει τον Δία ως ένα «κοσμικό ρολόι» και να προβλέψει τη θέση των δορυφόρων του, οι οποίοι ήταν γνωστοί πάνω από μισό αιώνα να περιφέρονται γύρω του με περιодιότητα. Οι υπολογισμοί του προσδιόριζαν με ακρίβεια πότε ο δορυφόρος του Ιώ θα έμπαινε στην σκιά του Δία καθώς ήταν γνωστό ότι η Ιώ περιφέρεται περίπου με περίοδο 1.76 ημερών οπότε κάθε 1.76,  $2 \times 1.76$ ,  $3 \times 1.76$  ημέρες κ.ο.κ. η τροχιά της θα την έφερνε πίσω από το Δία για έναν γήινο παρατηρητή. Ο Roemer παρατήρησε ότι αυτές οι εκλείψεις υστερούσαν χρονικά όλο και περισσότερο καθώς η Γη απομακρυνόταν από το Δία κατά την ετήσια κίνησή της. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 κάνοντας παρατηρήσεις όταν η Γη βρίσκεται στις θέσεις *A* και *B* που διαφέρουν χρονικά μισό έτος (180 ημέρες) δηλαδή όταν η Γη βρίσκεται στη πιο απομακρυσμένη θέση της τροχιάς της γύρω από τον Ήλιο (*B*) και πολύ μακρύτερα από τον Δία<sup>1</sup>, θα περίμενε κανείς την Ιώ να αναδύεται από τη σκιά του Δία στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή που είχε προβλέψει ο Roemer με μεγάλη ακρίβεια. Η

<sup>1</sup>Ο Δίας περιφέρεται σχετικά αργά στην τροχιά του γύρω από τον Ήλιο (12 έτη) κι άρα μόνο η κίνηση της Γης επηρεάζει το φαινόμενο



Σχήμα 3.2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Ιώ όμως παρατηρήθηκε περίπου ένα τέταρτο αργότερα ενώ όταν η απόσταση Δία-Γης μίκραινε, οι εκλείψεις πλησίαζαν ξανά την αποδεκτή τιμή της 1.76 ημέρας. Ο Roemer απέδωσε την απόκλιση των προβλέψεών του στην πεπερασμένη ταχύτητα του φωτός. Το φαινόμενο όντως συνέβη στο χρονικό διάστημα που προβλέφθηκε αλλά το πληροφορηθήκαμε αργότερα από το αναμενόμενο γιατί το φως από τον Δία πρέπει να ταξιδέψει την επιπλέον απόσταση κατά την οποία είχε μετακινηθεί η Γη (περίπου ίση προς τη διπλάσια απόσταση Γης - Ήλιου δηλαδή περίπου 300 000 000 km) και η καθυστέρηση είναι λίγο περισσότερη από περίπου 16 λεπτά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παρατήρηση του Δία από τη Γη στη θέση του σχήματος 3.2 δεν είναι εύκολη γιατί βρίσκεται κοντά στον Ήλιο και μπορεί να παρατηρηθεί όταν είναι χαμηλά στον δυτικό ορίζοντα μετά το ηλιοβασίλεμα.

Αργότερα ο Huygens υπολόγισε με βάση τα δεδομένα του Roemer, τιμή ίση με τα 2/3 της σημερινής αποδεκτής τιμής, λόγω των εσφαλμένων εκτιμήσεων των τροχιών Γης και Δία εκείνη την εποχή. Η άποψη περί πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός δεν έγινε αποδεκτή παρά μέχρι το 1727 με τις μετρήσεις της απόκλισης του φωτός του James Bradley. Η μέθοδος του Roemer όμως από ιστορική σημασία απετέλεσε και την πρώτη ένδειξη ότι κάθε παρατήρησή μας αναφέρεται σε ένα γεγονός που έχει ήδη γίνει ή όπως συνήθως λέγεται «όσο μακρύτερες αποστάσεις παρατηρούμε τόσο πίσω χρονικά στην ιστορία του σύμπαντος πηγαίνουμε».

### 3.3 Διάδοση της ακτινοβολίας

Η διεύθυνση διάδοσης του φωτός στο κενό είναι ευθεία. Όταν όμως διαδίδεται μέσα ή κοντά από ένα υλικό σώμα, η διεύθυνσή του μεταβάλλεται λόγω ανάκλασης, διάθλασης ή περίθλασης. Η μελέτη αυτών των φαινομένων είναι σημαντική για την κατασκευή ανιχνευτικών συσκευών (τηλεσκόπια, ανιχνευτές).

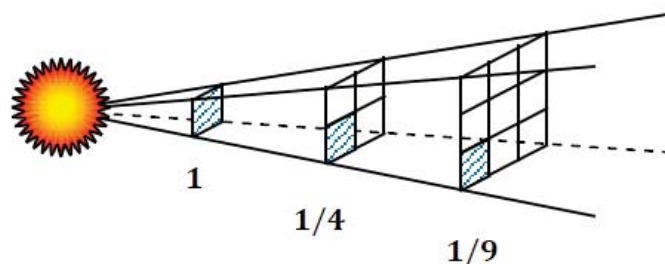
Μια σημαντική όμως ιδιότητα της διάδοσης του φωτός αλλά και άλλων μορφών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (για παράδειγμα ήχος) είναι ότι ακολουθεί το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης κατά τη διάδοσή του. Αν θεωρήσουμε ένα σώμα ακτίνας  $R$  (έναν αστέρα ή ακόμη και έναν κοινό λαμπτήρα) που εκπέμπει ακτινοβολία  $L$  (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου), η γεωμετρική εξασθένιση της εκπεμπόμενης ενέργειας από την επιφάνεια του σώματος  $F$  (ροή ενέργειας δηλαδή ενέργεια ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας), ακολουθεί το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης. Δηλαδή, η μετρούμενη ροή  $f$  που λαμβάνει ένας ανιχνευτής συγκεκριμένης επιφάνειας, (είτε ένα τηλεσκόπιο είτε ο γυμνός οφθαλμός), σε απόσταση  $r$  θα είναι

$$\frac{f}{F} = \frac{4\pi R^2}{4\pi r^2} = \left(\frac{R}{r}\right)^2, \quad (3.2)$$

και αυτό γιατί η εκπεμπόμενη ενέργεια  $L$  θα διασπείρεται σε μία σφαίρα επιφάνειας  $4\pi r^2$ . Κατά συνέπεια, η παρατηρούμενη ροή ενέργειας  $f$  συνδέεται με την ενέργεια  $L$  που εκπέμπει το σώμα με τη σχέση

$$f = \frac{L}{4\pi r^2}. \quad (3.3)$$

Για παράδειγμα, η μετρούμενη φωτεινή ροή ενέργειας ενός λαμπτήρα ισχύος 100W είναι μικρότερη κατά  $1/4$  αν διπλασιάσουμε την απόστασή μας από αυτόν άρα το



Σχήμα 3.3: Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου της διάδοσης της ακτινοβολίας.



πόσο λαμπρός φαίνεται ο λαμπτήρας (φαινόμενη λαμπρότητα) εξαρτάται από την απόστασή του και συνδέεται με τη μετρούμενη ροή του (σχήμα 3.3). Άρα, αν  $r$  είναι η απόσταση ενός σώματος από τη Γη, αυτό που τελικά μετράμε στην επιφάνεια της Γης με τα τηλεσκόπια ή με γυμνό οφθαλμό είναι ένα μέρος της ακτινοβολίας που περνά από τη σφαίρα ακτίνας  $r$  γι αυτό και η μετρούμενη ροή ενέργειας είναι αυτή που συνδέεται με τη φαινόμενη λαμπρότητα του σώματος  $b$ .

Η μετρούμενη ροή ενέργειας στη Γη από τον Ήλιο είναι

$$f_{\odot} = 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (3.4)$$

Εάν γνωρίζουμε τη φωτεινότητα  $L$  ενός σώματος και μετρήσουμε τη ροή του  $f$ , τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε και την απόστασή του. Για αυτό το λόγο και τα σώματα με γνωστές φωτεινότητες - αν και λίγα - είναι πολύ σημαντικά στην αστροφυσική γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σταθεροί φωτεινοί δείκτες για τη μέτρηση αποστάσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο γεωμετρικός νόμος της εξασθένησης δεν μας δίνει πληροφορίες για τη φύση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

**Ερώτηση:** Αν η απόσταση Ήλιου-Δία είναι πενταπλάσια της απόστασης Ήλιου-Γης, ποια θα ήταν η φαινόμενη λαμπρότητα του Ήλιου για έναν παρατηρητή στο Δία, σε σχέση με την φαινόμενη λαμπρότητά του για έναν παρατηρητή στη Γη;

### 3.4 Ακτινοβολία μέλανος σώματος ή θερμική ακτινοβολία

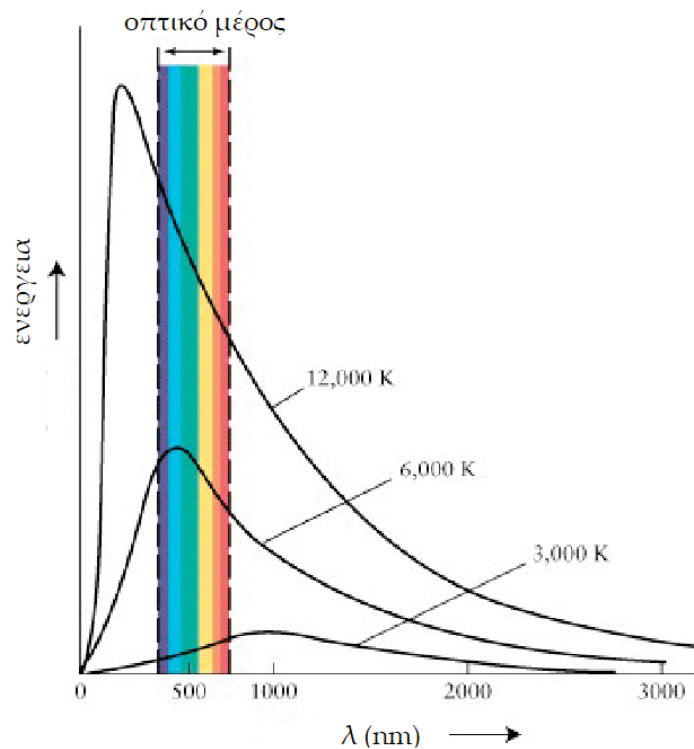
Προκειμένου να μελετήσουμε τη φύση της ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα σώματα παρατηρούμε ότι όταν σε ένα αδιαφανές σώμα προσπέσει ακτινοβολία, ένα μέρος της ανακλάται και το υπόλοιπο απορροφάται. Το σώμα λόγω της απορρόφησης ακτινοβολίας (ενέργειας) θερμαίνεται και εκπέμπει ενέργεια προκειμένου να απάγει τη θερμότητα. Η κατανομή του ρυθμού έκλυσης της ακτινοβολίας σε σχέση με το μήκος κύματος που εκπέμπει ένα τέτοιο σώμα καθορίζεται από την θερμοκρασία την οποία έχει όταν εγκαθιδρυθεί θερμοδυναμική ισορροπία, όταν δηλαδή επανεκπέμπει ενέργεια με τον ίδιο ρυθμό που την απορροφά. Ένα υποθετικό σώμα το οποίο απορροφά πλήρως όποια ακτινοβολία προσπέσει επάνω του ονομάζεται μέλαν σώμα. Η θερμοκρασία του εξαρτάται μόνο από τη συνολική ενέργεια που προσπίπτει επάνω του. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4, το φάσμα της ενέργειας που επανεκπέμπει ένα μέλαν σώμα είναι διαφορετικό από αυτό της ακτινοβολίας που απορροφά και έχει ένα χαρακτηριστικό σχήμα το οποίο εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και όχι από άλλους παράγοντες όπως η χημική σύνθεση. Αυτή η μορφή εκπεμπόμενης ενέργειας ονομάζεται θερμική ακτινοβολία. Αυτό σημαίνει ότι όταν για παράδειγμα ένα μέλαν σώμα απορροφήσει ενέργεια από πηγή που χαρακτηρίζεται από γραμμικό φάσμα εκπομπής, τότε θερμαίνεται και εκπέμπει ακτινοβολία που έχει τη χαρακτηριστική

μορφή του σχήματος 3.4 χωρίς να διατηρήσει κανένα ίχνος της ακτινοβολίας που προσέπεσε πάνω του. Η ένταση της ακτινοβολίας  $I(\lambda, T)$  που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας  $T$ , το ποσό δηλαδή της ενέργειας που ακτινοβολείται ανά μονάδα του χρόνου, ανά μονάδα μήκους κύματος, ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα στερεάς γωνίας σε διεύθυνση κάθετη στη στοιχειώδη επιφάνεια, δίνεται από το νόμο του Planck

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}, \quad (3.5)$$

όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος μετρούμενο σε  $cm$ ,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος μετρούμενη σε βαθμούς Kelvin,  $k_B$  είναι η σταθερά του Boltzmann,  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός και  $h$  είναι η σταθερά του Planck. Οι μονάδες της έντασης στο σύστημα CGS είναι  $erg \cdot sec^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-2} \cdot \text{\AA}^{-1}$ .

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η κατανομή της ενέργειας που ακτινοβολείται από ένα μέλαν σώμα σε σχέση με το μήκος κύματος όπως υπολογίζεται από το νόμο του Planck για μέλανα σώματα διαφορετικών θερμοκρασιών. Από το σχήμα παρατηρείται ότι ένα μέλαν σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απολύτου μηδενός εκπέμπει



Σχήμα 3.4: Το φάσμα του μέλανος σώματος.

σε όλα τα μήκη κύματος αλλά όχι το ίδιο ποσό ενέργειας. Επιπλέον παρατηρείται ότι υπάρχει ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda_{\max}$  στο οποίο ένα μέλαν σώμα εκπέμπει το μέγιστο της ακτινοβολίας του. Αυτό προσδιορίζεται από το νόμο μετατοπίσεως του Wien

$$\lambda_{\max} T \simeq 0.3 \text{ cm} \cdot K, \quad (3.6)$$

όπου το μήκος κύματος  $\lambda$  μετράται σε  $\text{cm}$  και η θερμοκρασία  $T$  σε βαθμούς  $K$ . Ο νόμος αυτός δείχνει ότι το χρώμα (μήκος κύματος) της μέγιστης εκπομπής ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της θερμοκρασίας του. Αυτό σημαίνει όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.4 ότι ένα θερμότερο μέλαν σώμα εκπέμπει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του σε μικρότερα μήκη κύματος απ' ό,τι ένα ψυχρότερο μέλαν σώμα. Επιπλέον αν αθροίσουμε την ενέργεια που ακτινοβολείται από ένα μέλαν σώμα μιας συγκεκριμένης θερμοκρασίας  $T$  σε όλα τα μήκη κύματος (σε όλο το φάσμα), αν δηλαδή εμβαδομετρήσουμε την επιφάνεια που περικλείεται από την καμπύλη, υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα

$$I(T) = \int_0^{+\infty} I(\lambda, T) d\lambda, \quad (3.7)$$

βρίσκουμε την ολική ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από αυτό. Αυτή είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα στερεάς γωνίας κατά διεύθυνση κάθετο στην στοιχειώδη επιφάνεια. Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροή ενέργειας  $F$  που εκλύεται από την επιφάνειά του προς το εξωτερικό μέρος του, δηλαδή την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας και αυτό γιατί τα δύο μεγέθη συνδέονται εγγενώς μέσω της σχέσης

$$F = \pi I, \quad (3.8)$$

η οποία ακολουθεί τον νόμο των Stefan-Boltzmann

$$F = \sigma T^4, \quad (3.9)$$

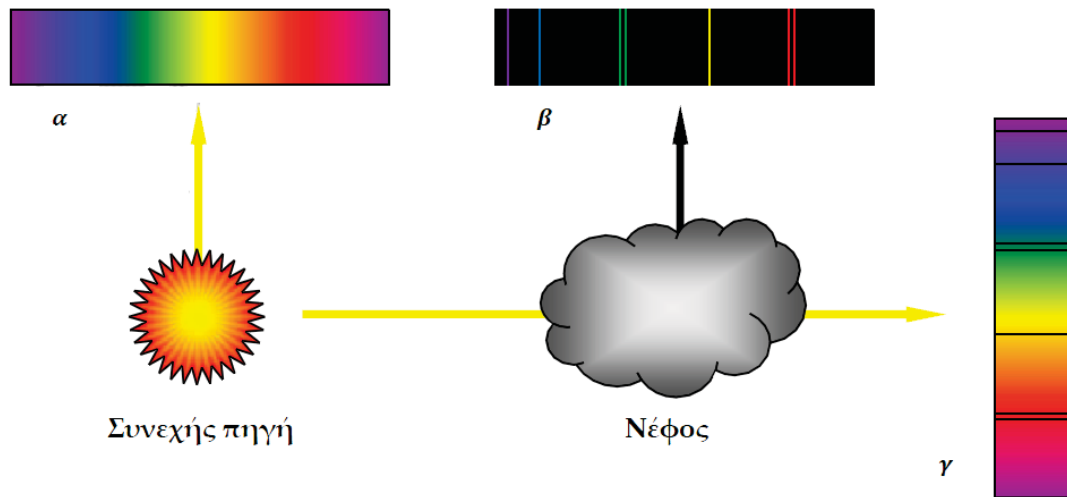
όπου  $\sigma$  η σταθερά των Stefan-Boltzmann. Η τελευταία σχέση δείχνει ότι η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα αυξάνει πολύ γρήγορα αυξανόμενης της θερμοκρασίας του. Αυτό σημαίνει ότι εάν ένα μέλαν σώμα είναι δύο φορές θερμότερο (διπλάσια θερμοκρασία) από ένα άλλο, εκπέμπει  $2^4$  δηλαδή 16 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας σε όλα τα μήκη κύματος σε σχέση με το ψυχρότερο μέλαν σώμα. Αυτό είναι εμφανές από το σχήμα 3.4 που δείχνει ότι το ύψος της καμπύλης Planck για το ίδιο αντικείμενο αυξανόμενης της θερμοκρασίας του, αυξάνει κι άρα αυξάνει το ολικό ποσό της εκπεμπόμενης ενέργειας.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ο όρος μέλαν (μαύρο) χρησιμοποιείται για να γίνει διάκριση από τα σώματα που ανακλούν το φως και αναφέρεται στο γεγονός ότι ένα τέτοιο σώμα απορροφά κάθε μήκος κύματος ορατής ακτινοβολίας (γι αυτό και φαίνεται μαύρο) χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν εκπέμπει ακτινοβολία σε άλλα μέρη του φάσματος όπως για παράδειγμα υπέρυθη.

### 3.5 Είδη φασμάτων

Όταν το φως, το οποίο δεν είναι παρά ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από μία φωτεινή (διάπυρη) πηγή περάσει μέσα από ένα πρίσμα ή άλλη ανάλογη συσκευή ανάλυσης, σχηματίζεται το φάσμα της πηγής, η κατανομή δηλαδή της ενέργειάς της σε σχέση με το μήκος κύματος. Τα φάσματα μελετώνται αναλυτικά με τη χρήση φασματοσκοπίου και φωτογραφίζονται με τη χρήση φασματογράφου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5, διακρίνουμε τρία είδη φασμάτων, ανάλογα με τη φύση της πηγής. Ο πρώτος που τα διέκρινε πειραματικά ήταν ο Gustav Kirchoff το 1859 ο οποίος κατέληξε στις εξής διαπιστώσεις που είναι γνωστές ως οι τρεις εμπειρικοί νόμοι της φασματικής ανάλυσης.

1. Ένα θερμό στερεό, υγρό ή ισχυρά συμπιεσμένο αέριο εκπέμπει ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και σχηματίζει φάσμα που αποτελείται από μία συνεχή επαλληλία μηκών κύματος (χρωμάτων) που διαδέχονται ομαλά το ένα το άλλο (σχήμα 3.5.α). Λόγω της μορφής του αυτό το φάσμα ονομάζεται συνεχές.
2. Ένα θερμό αραιό (χαμηλής πυκνότητας) αέριο εκπέμπει ακτινοβολία μόνο σε ορισμένα μήκη κύματος, σχηματίζοντας φάσμα το οποίο ονομάζεται γραμμικό φάσμα εκπομπής που αποτελείται από συγκεκριμένες λαμπρές γραμμές σε σκοτεινό υπόβαθρο (σχήμα 3.5.β). Ο αριθμός και η θέση αυτών των γραμμών (το μήκος κύματός τους) εξαρτώνται από τα στοιχεία που περιέχονται στο αέριο.



Σχήμα 3.5: Τα τρία φάσματα που παρατηρούνται στη φύση.

3. Εάν το φως μίας πηγής συνεχούς ακτινοβολίας περάσει μέσα από ένα ψυχρότερο (χαμηλότερης θερμοκρασίας) αραιό αέριο, το ψυχρότερο αέριο προκαλεί την εμφάνιση σκοτεινών (ή αμυδρών) γραμμών πάνω στο συνεχές φάσμα της πηγής (σχήμα 3.5.γ). Το φάσμα αυτό ονομάζεται φάσμα απορρόφησης και οι σκοτεινές γραμμές, γραμμές απορρόφησης. Η θέση και ο αριθμός τους στο φάσμα εξαρτώνται από τα στοιχεία που περιέχει το ψυχρό αέριο.

Η σημασία των νόμων του Kirchoff έγκειται στο γεγονός ότι κάθε χημικό στοιχείο ή ένωση, όταν βρεθεί σε αέρια μορφή μπορεί να παράγει μία συγκεκριμένη σειρά γραμμών εκπομπής όταν είναι διεγερμένο ή γραμμές απορρόφησης, όταν διαμέσου του περάσει μία συνεχής ακτινοβολία, η οποία είναι χαρακτηριστική του στοιχείου (ή των στοιχείων που περιέχει η ένωση). Αυτό σημαίνει ότι κάθε αέριο μπορεί να απορροφήσει ή να εκπέμψει ακτινοβολία μόνο σε συγκεκριμένα μήκη κύματος που είναι χαρακτηριστικά αυτού του αερίου. Η παρουσία λοιπόν μιας σειράς συγκεκριμένων γραμμών εκπομπής (ή απορρόφησης) χαρακτηριστικών ενός στοιχείου αποτελεί ένδειξη της παρουσίας αυτού του στοιχείου σε κάποια τουλάχιστον σημεία της διαδρομής που ακολουθεί το φως της πηγής της οποίας το φάσμα αναλύουμε.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και χρειάστηκε η ανάπτυξη της κβαντομηχανικής προκειμένου να κατανοηθεί η εκπομπή των φασματικών γραμμών και η εξάρτησή τους από τη χημική σύσταση, για πολλές δεκαετίες τα φάσματα χρησιμοποιήθηκαν φαινομενολογικά και μόνο για τη διάγνωση της παρουσίας ή της απουσίας ενός χημικού στοιχείου.

**Σχόλιο** Στο εργαστήριο η πιο απλή πηγή παραγωγής συνεχούς φάσματος είναι το φως ενός απλού ηλεκτρικού λαμπτήρα. Για την παραγωγή γραμμικών φασμάτων χρησιμοποιούνται στοιχεία ή ενώσεις. Μία χημική ένωση που σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκεται σε στερεά μορφή, όπως το κοινό αλάτι ( $\text{NaCl}$ ) μετατρέπεται σε θερμοκρασία δωματίου σε διάπυρο αέριο με θέρμανση πάνω από φλόγα (λύχνο), αποσυντίθεται και όταν περάσει από το φασματοσκόπιο παράγει τις δύο χαρακτηριστικές λαμπρές κίτρινες γραμμές του νατρίου ( $\text{Na}$ ). Ένα στοιχείο που σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκεται σε αέρια μορφή, όπως το υδρογόνο ( $\text{H}$ ) μετατρέπεται σε διάπυρο αέριο με εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του σωλήνα που περιέχεται και εκπέμπει όπως διαπιστώνουμε όταν περάσει από φασματοσκόπιο δύο έντονες χαρακτηριστικές λαμπρές γραμμές στο κυανό ( $4861 \text{ \AA}$ ) και στο ερυθρό ( $6563 \text{ \AA}$ ) μέρος του φάσματος. Οι ίδιες γραμμές θα εμφανιστούν σαν σκοτεινές όταν το φως μίας συνεχούς πηγής περάσει από ψυχρό (και αραιό) αέριο υδρογόνο πριν να αναλυθεί στο φασματοσκόπιο. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα φάσμα απορρόφησης με πολλές σκοτεινές γραμμές, η αναγνώριση των αερίων των υπεύθυνων για αυτές, γίνεται μετά από τη σύγκριση των γραμμών που χαρακτηρίζουν το φάσμα εκπομπής των στοιχείων με τις γραμμές του φάσματος απορρόφησης.

## 3.6 Ατομικά μοντέλα

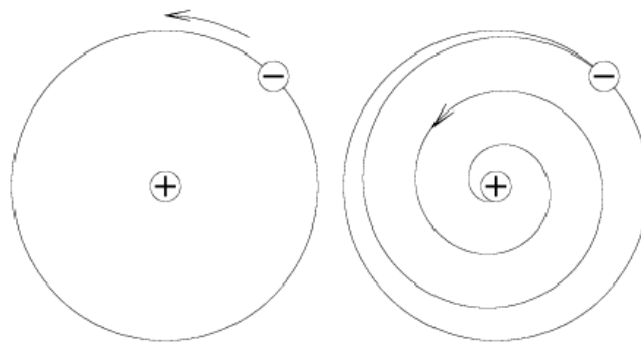
Η ατομική θεωρία αναπτύχθηκε με γρήγορους ρυθμούς τον 20<sup>ο</sup> αιώνα καθώς ανακαλύφθηκαν οι ιδιότητες των ατόμων και προτάθηκαν μία σειρά από μοντέλα που το ένα βελτιώνει το προηγούμενο.

### 3.6.1 Το μοντέλο του Thomson (το μοντέλο του σταφιδόψωμου)

Ο Joseph John Thomson ο οποίος είχε ανακαλύψει το ηλεκτρόνιο, πρότεινε ότι τα θετικά φορτία ήταν ομοιόμορφα καταναμημένα μέσα σε μία σφαίρα (το άτομο), ενώ τα αρνητικά (τα ηλεκτρόνια) ήταν εμβαπτισμένα μέσα σε αυτήν (σχήμα 3.8). Σε αυτό το μοντέλο όλη η μάζα του ατόμου ήταν συγκεντρωμένη στα ηλεκτρόνια, γεγονός που σήμαινε ότι τα περισσότερα άτομα θα έπρεπε να περιέχουν χιλιάδες ηλεκτρόνια και ότι δύο στοιχεία θα έπρεπε να διαφέρουν περισσότερο από ένα ηλεκτρόνιο.

### 3.6.2 Το μοντέλο του Rutherford

Ο Ernest Rutherford για να ελέγξει το μοντέλο του Thomson πραγματοποίησε πειράματα σκέδασης σωματίων (πυρήνων αποτελούμενων από 2 νετρόνια και 2 πρωτόνια) σε άτομα και μέτρησε την απόκλισή τους. Σύμφωνα με το μοντέλο του Thomson ανέμενε τα σωματρία να περάσουν ανεπηρέαστα μέσα από το άτομο αλλά τα πειραματικά του δεδομένα έδειξαν ότι μερικά σωματρία απέκλιναν της πορείας τους. Ο Rutherford συμπέρανε ότι τα άτομα είχαν έναν κεντρικό πυρήνα, ο οποίος περιείχε το θετικό φορτίο, γύρω από τον οποίο περιφέρονταν τα ηλεκτρόνια (σχήμα 3.8). Τα



Σχήμα 3.6: Το ηλεκτρόνιο του Rutherford καθώς κινείται σπειροειδώς προς τον πυρήνα.

σωμάτια είτε θα διαπερνούσαν την σχετικά κενή εξωτερική περιοχή του ατόμου ή θα περνούσαν πολύ κοντά από τον πυρήνα ώστε να αλληλεπιδράσουν μαζί του.

### 3.6.3 Το μοντέλο του Bohr

Ο Niels Bohr παρατήρησε ότι καθώς τα ηλεκτρόνια είναι φορείς φορτίου, εάν περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα θα πρέπει να επιταχύνονται και να εκπέμπουν ενέργεια. Θα έπρεπε τότε να παρατηρούμε

- Εκπεμπόμενη ενέργεια μικρότερης συχνότητας γιατί καθώς το ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια, θα κινείται σε χαμηλότερη ενεργειακή τροχιά (μικρότερη ακτίνα) κι επειδή η ενέργεια που θα εκπέμπει εξαρτάται από την ενέργεια της τροχιάς του (ανάλογη της επιτάχυνσής του) θα εκπέμπει και λιγότερη ενέργεια.
- Το ηλεκτρόνιο αφού συνεχώς θα εκπέμπει ενέργεια θα μεταπίπτει σε τροχιές μικρότερης ενέργειας, οπότε τελικά θα εκτελεί σπειροειδή κίνηση γύρω από τον πυρήνα μέχρι να πέσει πάνω του (σχήμα 3.6).

Τα άτομα όμως παρατηρήθηκαν να εκπέμπουν ακτινοβολία μόνο σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και τα ηλεκτρόνια να βρίσκονταν σε σταθερές, μη φθίνουσες τροχιές. Ο Bohr για να ερμηνεύσει το φάσμα του ατόμου του υδρογόνου<sup>2</sup> πρότεινε μία καινοτόμο ιδέα που απείχε από την κλασική θεωρία και χρησιμοποίησε το νέο πεδίο της κβαντικής μηχανικής, εισάγοντας τα εξής αξιώματα (υποθέσεις):

1. Τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες μέσα στα άτομα που είναι χαρακτηριστικές του ατόμου στις οποίες η στροφορμή,  $L$ , είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της σταθεράς του Planck,  $h$ , δηλαδή

$$L = mur = \frac{h}{2\pi} n = \hbar n, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.10)$$

όπου  $\hbar = h/2\pi$  η σύγχρονη σταθερά του Planck. Αυτές διαφέρουν από τις κλασικές στάθμες με την έννοια ότι ένα επιταχύνόμενο ηλεκτρόνιο δεν εκπέμπει συνεχώς ενέργεια (σχήμα 3.8). Από τη συνθήκη κβάντωσης της στροφορμής και από τις εξισώσεις της κυκλικής κίνησης, μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της τροχιάς  $a_n$ , η ενέργεια  $E_n$ , και η ταχύτητα  $u_n$  του ηλεκτρονίου που βρίσκεται στη στάθμη με κβαντικό αριθμό  $n$  στο άτομο του υδρογόνου, εξισώνοντας απλά τη δύναμη Coulomb με την κεντρομόλο δύναμη, δηλαδή

$$k \frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e u_e^2}{r}. \quad (3.11)$$

<sup>2</sup>Το 1885 ο Johann Balmer ανακάλυψε πειραματικά μια εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό του μήκους κύματος των φασματικών γραμμών του υδρογόνου (γραμμές Balmer) την οποία ο Niels Bohr χρησιμοποίησε ανάστροφα για να οδηγηθεί στη θεωρία του από την οποία μπορούσε να εξαχθεί μαθηματικά αυτή η σχέση με βάση τα αξιώματά του

Οι σχέσεις που προκύπτουν είναι

$$a_n = \left( \frac{\hbar^2}{k} m_e e^2 \right) n^2 = a_0 n^2, \quad (3.12)$$

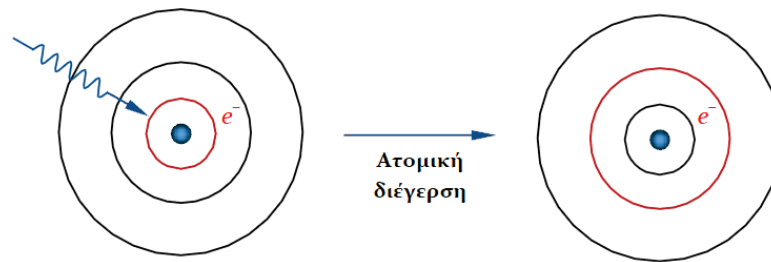
$$a_0 = a_1 = \left( \frac{\hbar^2}{k} m_e e^2 \right) = 0.529 \text{ \AA}, \quad (3.13)$$

$$E_n = -\frac{k^2 e^4 m_e}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}, \quad (3.14)$$

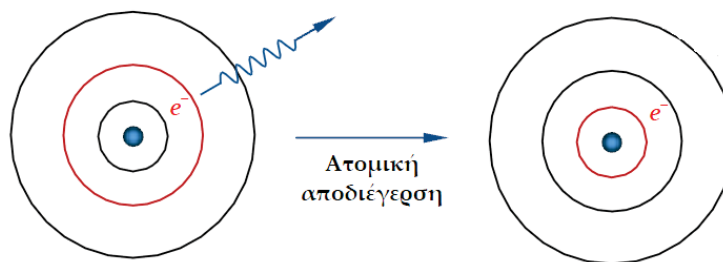
$$u_n = \frac{ke^2}{\hbar^2} \frac{1}{n} = \frac{c}{137} \frac{1}{n}. \quad (3.15)$$

Για άτομα με  $Z$  πρωτόνια στον πυρήνα, το  $e^2$  στην παραπάνω σχέση γίνεται  $Ze^2$ .

2. Το άτομο εκπέμπει ή απορροφά ενέργεια μόνο κατά τις μεταβάσεις του μεταξύ των σταθμών και η συχνότητα της εκπεμπόμενης (ή απορροφούμενης) ακτινοβολίας είναι ανάλογη της διαφοράς των ενεργειών τους  $\Delta E$ . Δηλαδή αφού η



Όταν ένα άτομο απορροφά συγκεκριμένη ακτινοβολία, ένα ηλεκτρόνιο μετατοπίζεται από μία στάθμη μικρής ενέργειας σε μία μεγαλύτερη.



Όταν ένα άτομο εκπέμπει ακτινοβολία, ένα ηλεκτρόνιο μετατοπίζεται από μία στάθμη μεγάλης ενέργειας σε μία μικρότερης.

Σχήμα 3.7: Η απορρόφηση (διέγερση) και η εκπομπή ακτινοβολίας (αποδιέγερση) από ένα άτομο.



ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια ενέργειας  $hc/\lambda$ , τα μόνα μήκη κύματος που μπορεί να απορροφήσει ή να εκπέμψει είναι αυτά που αντιστοιχούν σε φωτόνια ενέργειας των μεταβάσεων  $\Delta E$  (σχήμα 3.7)

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (3.16)$$

Υποθέτοντας λοιπόν ότι η ακτίνα των τροχιών των ηλεκτρονίων είναι συγκεκριμένη, η κινητική ενέργεια του ατόμου μπορεί να εκφραστεί με τη γωνιακή συχνότητα περιστροφής του κι άρα ως ακέραιο πολλαπλάσιο του  $h/2$ . Αυτή η ενέργεια είναι χβαντισμένη με την έννοια ότι εκπέμπεται σε συγκεκριμένες συχνότητες και άρα οι πιθανές ενέργειες του ατόμου του υδρογόνου είναι χβαντισμένες. Για το μοντέλο του αυτό, ο Bohr τιμήθηκε με το βραβείο Nobel το 1922.

### 3.6.4 Μοντέλο ηλεκτρονιακού νέφους

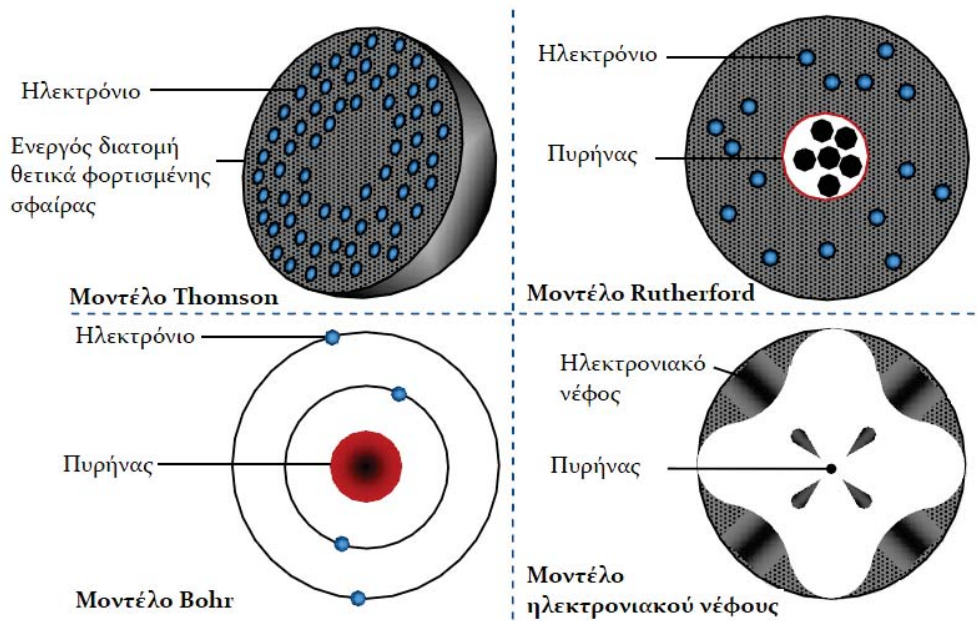
Το μοντέλο του Bohr αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε τις επόμενες δεκαετίες για να ερμηνεύσει τις πιο πολύπλοκες ενεργειακές στάθμες ατόμων που περιείχαν πολλά ηλεκτρόνια, το χωρισμό των φασματικών γραμμών παρουσία μαγνητικού πεδίου και τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων προς σχηματισμό μορίων. Επιπλέον

- εισήχθη η ιδέα του spin (στροφορμή λόγω ιδιοπεριστροφής) για να διακριθούν δύο ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην ίδια ενεργειακή στάθμη του ίδιου ατόμου.
- Η ειδική θεωρία της σχετικότητας φάνηκε να επηρεάζει την τροχιά των ηλεκτρονίων λόγω των μεγάλων ταχυτήτων τους και οδήγησε τον Sommerfeld στην εισαγωγή της ιδέας των ελλειπτικών (αντί κυκλικών) τροχιών των ηλεκτρονίων.

Η ερμηνεία των αξιωμάτων του Bohr δόθηκε από τον De Broglie, το 1923 με βάση τον κυματικό χαρακτήρα των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα (διττή φύση) η οποία αποδείχθηκε πειραματικά από τους 1927 από τους Davisson-Germer μετρώντας το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην κυματική φύση ενός σωματιδίου, το οποίο έγινε γνωστό ως μήκος κύματος De Broglie.

Η σημερινή εικόνα των ηλεκτρονίων δεν είναι πλέον αυτή των στερεών σφαιρικών σωματίων που περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου αλλά θεωρούνται ως μια διάχυτη δομή (δίχην νέφους) η οποία καταλαμβάνει μία περιοχή του ατόμου που καθορίζεται από συγκεκριμένη ενέργεια. Το ηλεκτρόνιο δεν καταλαμβάνει μία συγκεκριμένη θέση στο άτομο αλλά η θέση του περιγράφεται από μία συνάρτηση πιθανότητας με την οποία προσδιορίζεται η πιθανότητα να βρεθεί σε μία συγκεκριμένη θέση. Το άθροισμα όλων των πιθανοτήτων στο άτομο έχει άθροισμα ένα.

Αν και οι επιτρεπτές τιμές ενέργειας δίνονται από την ίδια εξίσωση με αυτή της θεωρίας του Bohr και εξαρτώνται μόνο από τον κύριο χβαντικό αριθμό  $n$ , για να



Σχήμα 3.8: Τα τέσσερα κύρια ατομικά μοντέλα.

περιγράψουμε πλήρως μια κβαντική κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου χρειάζομαστε τους κβαντικούς αριθμούς  $\ell$  της τροχιακής στροφορμής,  $m_\ell$  της προβολής της τροχιακής στροφορμής σε άξονα παράλληλο προς ένα εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο, και του μαγνητικού κβαντικού αριθμού του spin  $m_s$ . Για τα ηλεκτρόνια όμως (όπως και για τα πρωτόνια) ισχύει η απαγορευτική αρχή του Pauli σύμφωνα με την οποία στο ίδιο άτομο δεν μπορεί να υπάρξουν δύο φερμιόνια (σωματίδια με ημιακέραιο spin) ίδιους και τους τέσσερις παραπάνω κβαντικούς αριθμούς. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να κατανοήσουμε την ατομική δομή των στοιχείων.

*Σκεφτείτε την πρωτοποριακή ιδέα του Richard Feynman ότι πιθανόν υπάρχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο στο Σύμπαν το οποίο ταυτόχρονα βρίσκεται σε όλα τα άτομα σε κάθε στιγμή!*

### 3.6.5 Συμβολισμός των ατομικών καταστάσεων

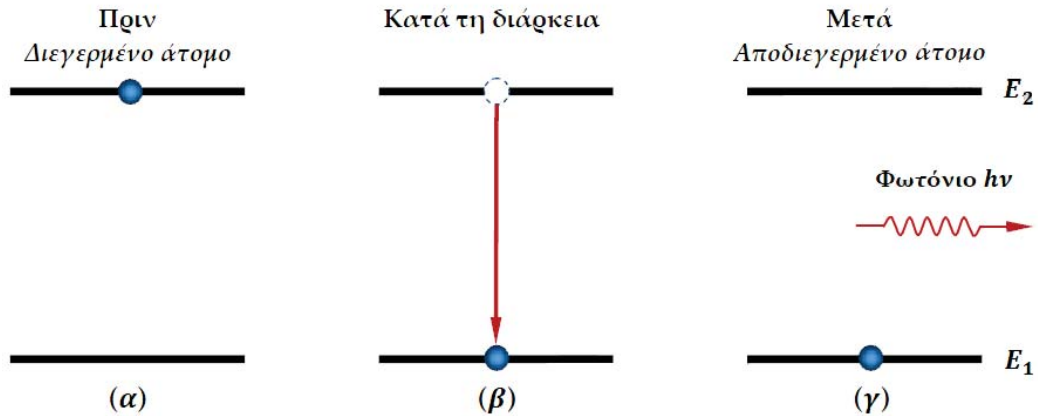
Ένα άτομο αποτελείται από ένα πυρήνα μεγάλης μάζας από πρωτόνια (θετικά φορτισμένα σωματίδια,  $p^+$ ) και νετρόνια (ουδέτερα σωματίδια  $n$ ), γύρω από τον οποίο περιφέρεται ένα νέφος πολύ μικρής μάζας ηλεκτρονίων (αρνητικά φορτισμένα σωμα-

τια,  $e^-$  με μάζα ίση με το  $1/1836$  της μάζας του πρωτονίου). Αυτό που καθορίζει ένα στοιχείο είναι ο αριθμός των πρωτονίων στον πυρήνα του ατόμου του.

- Για κάθε στοιχείο  $X$  ο συνολικός αριθμός πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα συμβολίζεται με  $A$  (μάζικος αριθμός) ενώ ο αριθμός των πρωτονίων του με  $Z$  (ατομικός αριθμός) και το στοιχείο γράφεται ως  $X_Z^A$ .
- Τα άτομα του υδρογόνου ( $H$ ) έχουν μόνο 1 πρωτόνιο.
- Τα άτομα του υδρογόνου με 1 πρωτόνιο και 1 ηλεκτρόνιο αποτελούν το ουδέτερο υδρογόνο  $H_1^1$ .
- Τα άτομα του υδρογόνου με 1 πρωτόνιο, 1 ηλεκτρόνιο και ένα νετρόνιο αποτελούν ένα βαρύ ισότοπο του υδρογόνου που καλείται δευτέριο  $H_1^2$ .
- Εάν ένα πρωτόνιο προστεθεί στο υδρογόνο προκύπτει ένα διαφορετικό στοιχείο, το ήλιο  $He_2^4$ .

### 3.7 Ερμηνεία των φασματικών γραμμών

Οι φασματικές γραμμές δημιουργούνται όταν μεταβάλλεται η ενέργεια ενός ατόμου, ιόντος (ελεύθερη ρίζα) ή μορίου μεταξύ συγκεκριμένων (χβαντισμένων) ενεργειακών σταθμών. Σύμφωνα με το ατομικό μοντέλο του Bohr τα άτομα χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες οι οποίες σε πρώτη αντιμετώπιση αντιστοιχούν στις διαφορετικές αποστάσεις των ηλεκτρονίων τους από τον πυρήνα. Μεταβάσεις των ηλεκτρονίων είναι δυνατές μόνο μεταξύ αυτών των επιτρεπτών σταθμών. Στο άτομο του υδρογόνου ( $H$ ) που είναι το πιο απλό με ένα μόνο ηλεκτρόνιο γύρω από τον πυρήνα του, η σταθερότερη θέση του ηλεκτρονίου είναι η στάθμη ελαχίστης ενέργειας (θεμελιώδης στάθμη). Όταν εφοδιάσουμε το άτομο με αρκετή ενέργεια όπως για παράδειγμα υπό μορφή ακτινοβολίας (σχήμα 3.9.α), το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει σε άλλη ενεργειακή στάθμη μεγαλύτερης ενέργειας ( $E_i \rightarrow E_j$ , όπου  $E_j > E_i$ ) με απορρόφηση ενός φωτονίου συγκεκριμένης ενέργειας (δηλαδή συγκεκριμένης συχνότητας  $\nu_{ij}$  έτσι ώστε να έχει ενέργεια  $h\nu_{ij} = E_j - E_i$ ) με αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας γραμμής απορρόφησης. Το άτομο τότε λέμε ότι διεγείρεται (σχήμα 3.9.β). Αυτή η κατάσταση διατηρείται για πολύ μικρό χρονικό διάστημα ( $10^{-8} \text{ sec}$ ) γιατί το άτομο επιστρέφει στη θεμελιώδη στάθμη απευθείας (ή με διαδοχικές μεταπηδήσεις σε στάθμες χαμηλότερης ενέργειας, όταν αυτό είναι εφικτό) αποβάλλοντας την επιπλέον ενέργεια (αποδιεγείρεται). Σε κάθε μεταπήδησή του εκπέμπει ένα φωτόνιο συγκεκριμένου μήκους κύματος  $\lambda = c/\nu_{ij}$  που αντιστοιχεί στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο σταθμών που ενέχονται στη μεταπήδηση  $\Delta E = h\nu_{ij} = E_j - E_i$ , με αποτέλεσμα την εκπομπή μίας γραμμής σε αυτό το μήκος κύματος (σχήμα 3.9.γ). Όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο σταθμών της μεταπήδησης τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα (και άρα τόσο



Σχήμα 3.9: Η διαδικασία της αποδιέγερσης ενός ατόμου.

μικρότερο είναι το μήκος κύματος) της γραμμής εκπομπής που παράγεται κατά την μεταπήδηση.

Επειδή τα άτομα μέσα σε ένα αέριο κινούνται (με μέση ταχύτητα που καθορίζει και τη θερμοκρασία του), ένα άτομο μπορεί να διεγερθεί (ή να αποδιεγερθεί) όχι μόνο μέσω απορρόφησης (και αντίστοιχα εκπομπής) ακτινοβολίας αλλά και μέσω συγκρούσεων με τα άλλα σωματίδια (χρυστική διέγερση και αποδιέγερση αντιστοίχως). Αν γνωρίζουμε τη θερμοκρασία του αερίου μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό των ατόμων που είναι διεγερμένα σε μία συγκεκριμένη ενεργειακή στάθμη.

Αν το άτομο απορροφήσει τόση ενέργεια ώστε να χάσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια (λόγω απόσπασής τους από τον πυρήνα) τότε λέμε ότι ιονίζεται ή (ισοδύναμα) ότι μετατρέπεται σε ιόν. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τον ιονισμό του ονομάζεται ενέργεια ιονισμού. Κάθε ενέργεια που είναι πάνω από την ενέργεια ιονισμού προσδίδεται ως κινητική ενέργεια στο ελεύθερο ηλεκτρόνιο που αποσπάται από τον πυρήνα. Ένα άτομο μπορεί να ιονιστεί μέσω απορρόφησης ακτινοβολίας αλλά και μέσω συγκρούσεων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι επιτρεπτές θεωρούνται οι μεταβάσεις που υπακούουν στον κανόνα επιλογής  $\Delta l = \pm 1$  γιατί θα πρέπει τα φωτόνια που εκπέμπονται ή απορροφώνται να έχουν στροφορμή  $\Delta l = \pm 1$  και  $\Delta m_l = 0, \pm 1$ . Οι έντονες φασματικές γραμμές αντιστοιχούν σε μεταβάσεις με μεγάλη πιθανότητα. Ο μέσος χρόνος ζωής μιας διεγερμένης κατάστασης είναι αντιστρόφως ανάλογος με την πιθανότητα μετάβασης, με την τυπική τιμή του χρόνου μετάβασης να είναι  $10^{-8} \text{ sec}$ . Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι μεταβάσεις για τις οποίες  $\Delta l \neq \pm 1$  είναι σπάνιες (απαγορευμένες) και η πιθανότητα να συμβούν είναι πολύ πιο μικρή αφού ο τυπικός

χρόνος μετάβασης είναι της τάξης του  $10^{-5}$  sec.

Στην περίπτωση των μορίων, η δημιουργία των φασματικών γραμμών είναι πιο πολύπλοκη γιατί δεν οφείλεται μόνο στη μεταβολή της ενέργειας των ηλεκτρονίων λόγω μεταβάσεων μεταξύ συγκεκριμένων ενεργειακών σταθμών αλλά και στη μεταβολή του πλάτους της ταλάντωσης (ή της σχετικής θέσης) των ατόμων τους καθώς και στη μεταβολή της στροφορμής τους λόγω περιστροφής του μορίου. Θεωρητικά μπορούμε να δείξουμε (από τον υπολογισμό των διαφορών των ενεργειακών σταθμών) ότι οι φασματικές γραμμές στην οπτική περιοχή οφείλονται κυρίως σε ενεργειακές μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων των ατόμων και όχι σε μεταπτώσεις μορίων ή ιόντων.

### 3.8 Το φάσμα του υδρογόνου

Το μοντέλο του ατόμου του Bohr ερμήνευσε επιτυχώς το γραμμικό φάσμα του ατόμου του υδρογόνου, που είναι το απλούστερο αλλά και το αφιθυνότερο στοιχείο στο Σύμπαν αλλά και των ατόμων που συμπεριφέρονται παρόμοια με αυτό. Οι χαρακτηριστικές ομάδες των φασματικών γραμμών του υδρογόνου ονομάζονται φασματικές σειρές και απεικονίζονται ως μεταβάσεις ανάμεσα στις επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες στο αντίστοιχο ενεργειακό διάγραμμα του σχήματος 3.10 όπου η ενέργεια της κάθε στάθμης ( $E$ ) δίνεται από τη σχέση

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} eV, \quad (3.17)$$

όπου  $n$  είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός που προσδιορίζει την ενεργειακή στάθμη  $E_n$  και παίρνει τις τιμές 1, 2, 3, ... Κατά τη μετάβαση του ηλεκτρονίου από μία στάθμη  $n_i$  σε μία στάθμη  $n_f$  (ή ανάστροφα), η συχνότητα ή το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται (ή απορροφάται αντίστοιχα) δίνεται από τη σχέση

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{|\Delta E|}{h} = R \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|. \quad (3.18)$$

Από τη διαδοχική εφαρμογή της παραπάνω σχέσης προκύπτουν οι συχνότητες ή τα μήκη κύματος των γραμμών των φασματικών σειρών ως εξής:

1. Για  $n_f = 1$  (η οποία αντιστοιχεί στη θεμελιώδη στάθμη) και  $n_i > n_f$  προκύπτει η σειρά εκπομπής Lyman. Για αποδιεγέρσεις της μορφής  $n_i \rightarrow n_f$  οι γραμμές σειράς Lyman είναι

$$\begin{array}{lll}
2 \rightarrow 1 & L_\alpha & \lambda = 1216 \text{ \AA} \\
3 \rightarrow 1 & L_\beta & \vdots \\
4 \rightarrow 1 & L_\gamma & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots \\
\infty \rightarrow 1 & L_\infty & \lambda = 912 \text{ \AA} \quad \text{Όριο της σειράς Lyman}
\end{array}$$

Η διαφορά ενέργειας μεταξύ των σταθμών  $\infty \rightarrow 1$  εκφράζει την ενέργεια ή έργο ιονισμού του ατόμου του υδρογόνου που είναι ίσο με  $13.6 \text{ eV}$ .

2. Για  $n_f = 2$  και  $n_i > n_f$  προκύπτει η σειρά εκπομπής Balmer. Για αποδιεγέρσεις της μορφής  $n_f \rightarrow n_i$  οι γραμμές σειράς Balmer είναι

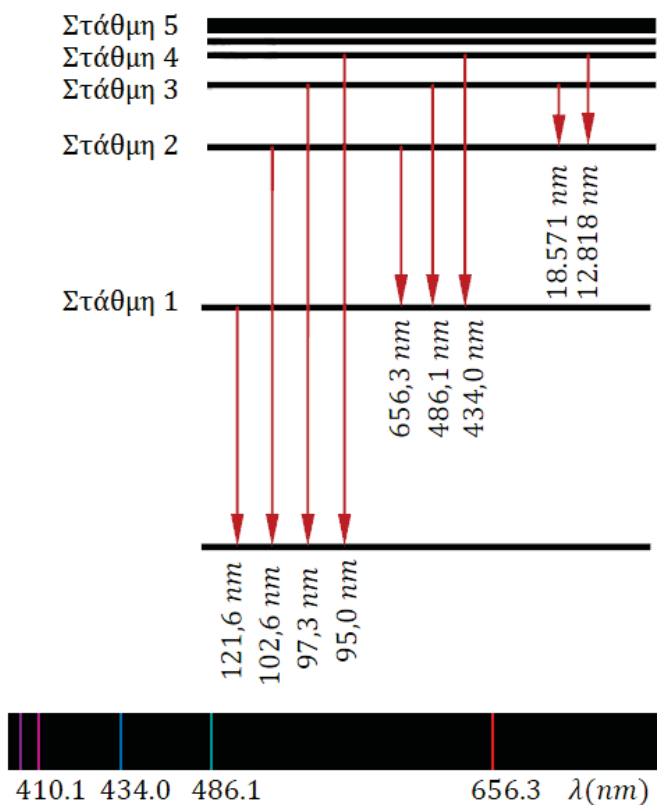
$$\begin{array}{lll}
3 \rightarrow 2 & H_\alpha & \lambda = 6563 \text{ \AA} \\
4 \rightarrow 2 & H_\beta & \vdots \\
5 \rightarrow 2 & H_\gamma & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots \\
\infty \rightarrow 2 & H_\infty & \lambda = 3564 \text{ \AA} \quad \text{Όριο της σειράς Balmer}
\end{array}$$

3. Για  $n_f = 3$  και  $n_i > n_f$  προκύπτει η σειρά εκπομπής Paschen. Για αποδιεγέρσεις της μορφής  $n_i \rightarrow n_f$  οι γραμμές σειράς Paschen είναι

$$\begin{array}{lll}
4 \rightarrow 3 & P_\alpha & \lambda = 18751 \text{ \AA} \\
5 \rightarrow 3 & P_\beta & \vdots \\
6 \rightarrow 3 & P_\gamma & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots \\
\infty \rightarrow 3 & P_\infty & \lambda = 8204 \text{ \AA} \quad \text{Όριο της σειράς Paschen}
\end{array}$$

Οι υπόλοιπες σειρές προκύπτουν κατά παρόμοιο τρόπο: Brackett για  $n_f = 4$ , Paschen για  $n_f = 5$  κ.ο.κ.. Αν στις παραπάνω γραμμές εναλλαχθούν τα  $n_i$  με τα  $n_f$  τότε παίρνουμε τις αντίστοιχες γραμμές απορρόφησης. Όπως παρατηρούμε, από όλες τις φασματικές σειρές του υδρογόνου, μόνο οι γραμμές της σειράς Balmer βρίσκονται στο ορατό μέρος του φάσματος. Οι γραμμές της σειράς Lyman βρίσκονται στο υπεριώδες ενώ οι γραμμές της σειράς Paschen και όλες οι επόμενες στο υπέρυθρο για  $n_f > 30$ . Οι φασματικές γραμμές που προέρχονται από μεταβάσεις ηλεκτρονίων μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργειακών σταθμών για  $n_f > 30$  έχουν χαμηλή ενέργεια και ανήκουν στο ραδιοφωνικό μέρος του φάσματος (όπως η γραμμή  $H_{109\alpha}$  η οποία αποδιεγείρεται από τη στάθμη  $n_i = 110$  στην  $n_f = 109$ ).

Η παραπάνω εικόνα του φάσματος αποτελεί την απλοποιημένη περιγραφή της κάθε στάθμης μόνο με τον κύριο κβαντικό αριθμό  $n$  και δεν περιλαμβάνει το διαχωρισμό σε υποστάθμες ανάλογα με τους υπόλοιπους κβαντικούς αριθμούς ( $\ell, m_\ell, m_s$ )



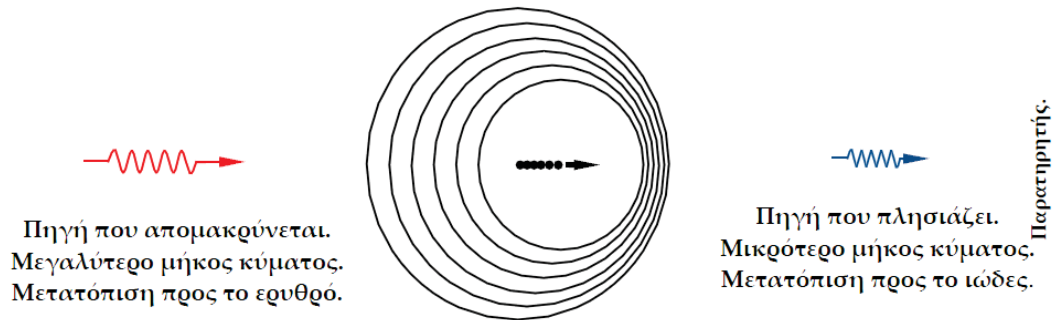
Σχήμα 3.10: Οι κύριες αποδιεγέρσεις του ατόμου του υδρογόνου.

με τους οποίους περιγράφεται πλήρως η κατάσταση του ηλεκτρονίου. Όπως αναφέρθηκε οι μεταβάσεις ηλεκτρονίων μεταξύ των διαφόρων ενεργειακών σταθμών που δίνουν γένεση στις παρατηρούμενες φασματικές γραμμές, δεν είναι όλες επιτρεπτές αλλά υπόκεινται σε συγκεκριμένους κανόνες επιλογής.

### 3.9 Μετατόπιση Doppler

Το φως των κινουμένων αντικειμένων παρατηρείται σε διαφορετικά μήκη κύματος σε σχέση με αυτά που εκπέμπεται ανάλογα με τη σχετική κίνηση της πηγής και του παρατηρητή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Αυτή η μετατόπιση ονομάζεται μετατόπιση Doppler και όταν η ταχύτητα της πηγής είναι μικρή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_\epsilon} = \frac{u}{c}, \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.11: Το φαινόμενο Doppler.

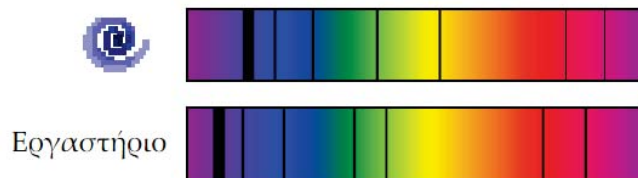
όπου  $u$  είναι η ταχύτητα της πηγής,  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $\lambda_e$  το μήκος κύματος της παρατηρούμενης γραμμής εάν η πηγή ήταν ακίνητη (δηλαδή όπως μετράται στο εργαστήριο) και  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_e$  η παρατηρούμενη μετατόπιση του μήκους κύματος.

Όταν ο παρατηρητής παρατηρεί ένα αντικείμενο που απομακρύνεται από αυτόν με ταχύτητα  $u$ , παρατηρεί ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος από αυτήν που εκπέμφθηκε (μετατόπιση στο ερυθρό), ενώ όταν παρατηρεί ένα αντικείμενο που πλησιάζει, παρατηρεί ακτινοβολία μικρότερου μήκους κύματος από αυτήν που εκπέμφθηκε (μετατόπιση στο κυανό).

Εάν η πηγή κινείται με ταχύτητα παραπλήσια της ταχύτητας του φωτός τότε η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = z, \quad \text{όπου} \quad z = \sqrt{\frac{c+u}{c-u}} - 1. \quad (3.20)$$

Από την παρατήρηση της μετατόπισης Doppler των αστρικών σωμάτων, μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για την ταχύτητά τους στην ευθεία οράσεως (ακτινική



Σχήμα 3.12: Φάσματα γαλαξία (πάνω) και εργαστηρίου (κάτω).



ταχύτητα) αλλά και για την περιστροφή τους.

**Παράδειγμα 3.1:** Έστω ότι παίρνουμε το φάσμα ενός γαλαξία (σχήμα 3.12) και μετράμε τις γραμμές του ιονισμένου ασβεστίου στα  $397 \text{ nm}$  και στα  $401 \text{ nm}$ , του ατομικού υδρογόνου στα  $414 \text{ nm}$ ,  $438 \text{ nm}$ ,  $491 \text{ nm}$ ,  $663 \text{ nm}$ , του ουδέτερου μαγνήσιου στα  $523 \text{ nm}$  και ουδέτερου νατρίου στα  $595 \text{ nm}$ . Γνωρίζοντας ότι το μήκος κύματος στο σύστημα του εργαστηρίου ( $\lambda_\epsilon$ ), για το ιονισμένο ασβέστιο είναι  $393 \text{ nm}$ , για το ατομικό υδρογόνο  $410 \text{ nm}$ ,  $434 \text{ nm}$ ,  $486 \text{ nm}$ ,  $656 \text{ nm}$ , για το ουδέτερο μαγνήσιο  $518 \text{ nm}$  και για το ουδέτερο νάτριο  $489 \text{ nm}$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινική του ταχύτητα.

Παρατηρούμε ότι οι γραμμές είναι μετατοπισμένες στο ερυθρό κι άρα από τη μετατόπιση Doppler

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_\epsilon} = \frac{\lambda_\pi}{\lambda_\epsilon} - 1, \quad (3.21)$$

οι ερυθρές μετατοπίσεις για κάθε στοιχείο είναι:

### Ιονισμένο ασβέστιο

$$z_{Ca^+} = \frac{397}{393} - 1 = \frac{401}{397} - 1 = 0.01. \quad (3.22)$$

### Υδρογόνο

$$z_H = \frac{414}{410} - 1 = \frac{438}{434} - 1 = \frac{491}{486} - 1 = \frac{663}{656} - 1 = 0.01 \quad (3.23)$$

### Μαγνήσιο

$$z_{Mg} = \frac{523}{518} - 1 = 0.01. \quad (3.24)$$

### Νάτριο

$$z_{Na} = \frac{595}{589} - 1 = \frac{401}{397} = 0.01. \quad (3.25)$$

Άρα, η ερυθρά μετατόπιση του γαλαξία είναι  $z = 0.01$ . Η ακτινική ταχύτητα μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση

$$u_r = cz = 3000 \text{ km/sec}, \quad (3.26)$$

άρα συμπεραίνουμε ότι κινείται με  $u = 0.01c$ , γιατί το μήκος κύματος των γραμμών του είναι μετατοπισμένο κατά 1% προς το ερυθρό.

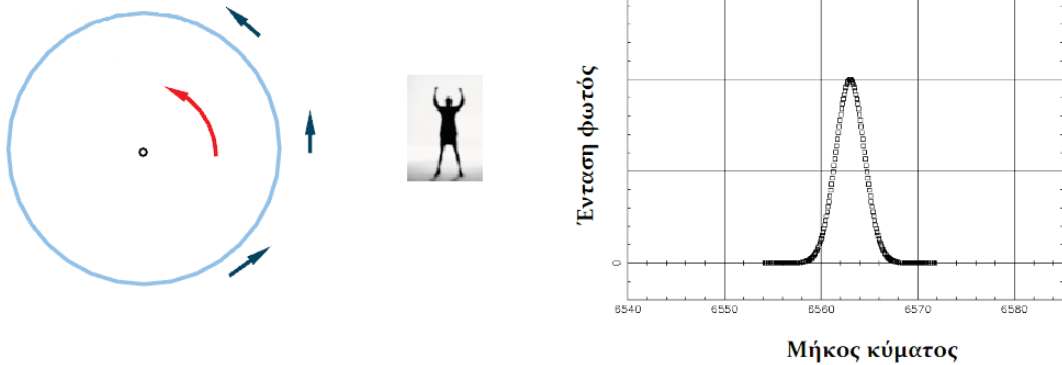


Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για  $z > 1$  η ταχύτητα δεν προσεγγίζεται από την παραπάνω σχέση ούτε από την σχετικιστική σχέση του φαινομένου Doppler

$$z = \sqrt{\frac{c+u}{c-u}} - 1, \quad (3.27)$$

αλλά εξαρτάται από κοσμολογικές παραμέτρους.

Επιπλέον όταν ένα σώμα (αστέρας, γαλαξίας) περιστρέφεται τότε τα διαφορετικά τμήματά του φαίνονται να κινούνται με διαφορετικές ακτινικές ταχύτητες. Τα τμήματα που απομακρύνονται θα παρατηρούνται μετατοπισμένα στο ερυθρό, τα τμήματα που πλησιάζουν μετατοπισμένα στο κυανό ενώ το μεγαλύτερο μέρος του που κινείται κάθετα στον παρατηρητή δεν θα παρουσιάζει μετατόπιση. Έτσι εάν το παρατηρήσουμε σε μία φασματική γραμμή, αυτή θα έχει την κατατομή του σχήματος 3.13 δηλαδή θα έχει μία συνιστώσα προς το ερυθρό και μία προς το κυανό κι από το πλάτος της μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα περιστροφής του αντικειμένου.



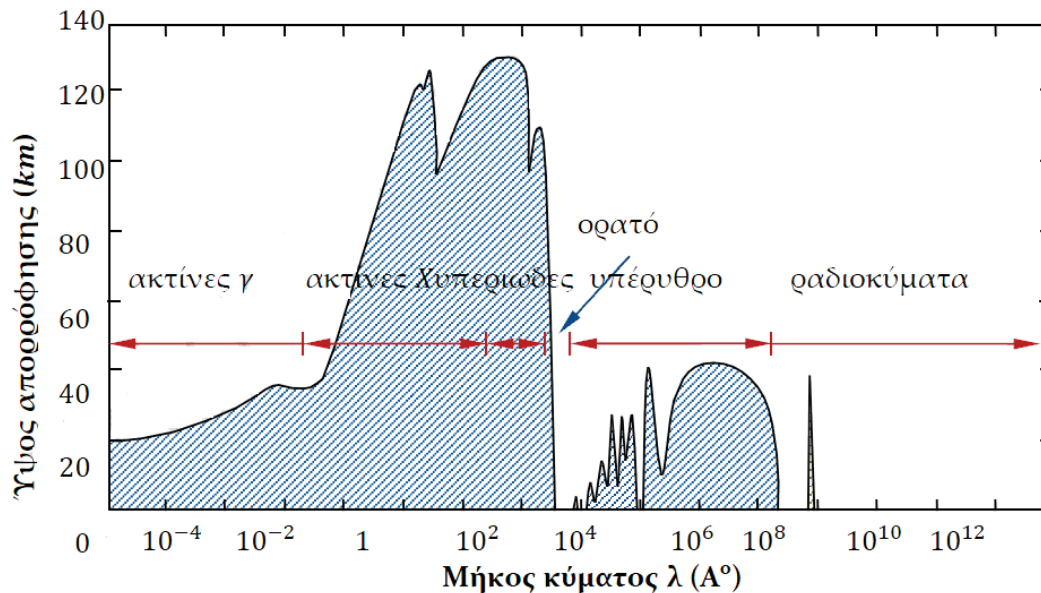
Σχήμα 3.13: Η επίδραση της περιστροφής ενός σώματος στην κατανομή μίας φασματικής γραμμής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# Τα τηλεσκόπια

### 4.1 Ατμοσφαιρικά παράθυρα

Τα μόρια της γήινης ατμόσφαιρας απορροφούν ένα μεγάλο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να είναι αδιαφανής σε ορισμένα μήκη κύματος όπως φαίνεται από το σχήμα 4.1. Οι ακτίνες  $X$  και  $\gamma$  απορροφούνται κυρίως από μόρια οξυγόνου και αζώτου στην ιονόσφαιρα (100 km, πάνω από το ύψος που μπορούν να φτάσουν τα μετεωρολογικά αερόστατα και αεροπλάνα), η υπεριώδης ακτινοβολία από μόρια οξυγόνου και όζοντος σε ύψος 30 km, ενώ η υπέρυθη από υδρατμούς



Σχήμα 4.1: Τα παράθυρα ακτινοβολίας της γήινης ατμόσφαιρας.

και διοξείδιο του άνθρακα στο κατώτερο μέρος της ατμόσφαιρας (κάτω από 20 km). Οι δύο περιοχές του φάσματος στις οποίες η ατμόσφαιρα είναι διαφανής ονομάζονται «ατμοσφαιρικά παράθυρα» και είναι το οπτικό και εγγύς - υπέρυθρο μέρος του φάσματος και το ραδιοφωνικό ενώ στις υπόλοιπες φασματικές περιοχές η παρατήρηση της ακτινοβολίας των αστρικών αντικειμένων γίνεται με διαστημικά τηλεσκόπια σε τροχιά.

Τα σημαντικότερα διαστημικά τηλεσκόπια που μέχρι πρόσφατα ήταν σε τροχιά ή παραμένουν ακόμα σε λειτουργία εκτός από το Hubble που ανήκει στα οπτικά τηλεσκόπια είναι:

- Παρατηρητήριο Ακτίνων X Chandra (NASA): Πρόκειται για το τρίτο μετά το Hubble μεγαλύτερο διαστημικό τηλεσκόπιο που εκτοξεύτηκε το 1999. Πήρε το όνομά του από τον Ινδό φυσικό Subrahmanyan Chandrasekhar, γνωστό για τον καθορισμό του θεωρητικού ορίου της μέγιστης μάζας ενός λευκού νάνου (Chandra στα σανσκριτικά σημαίνει «σελήνη» και «φωτεινός»). Το Chandra όπως και το XMM (X-ray Multi-Mirrors Newton) (ESA) έχουν μελετήσει και ανακαλύψει μακρινούς γαλαξίες και άλλες πηγές ακτίνων-X ενώ σχεδιάζεται το XEUS ευαισθησίας 200 φορές μεγαλύτερης από το XMM Newton.
- Διαστημικό Τηλεσκόπιο Spitzer ή Space Infrared Telescope Facility, SIRTf (NASA): Λειτουργεί από το 2003 και είναι το τέταρτο μεγάλο διαστημικό τηλεσκόπιο, υπεύθυνο για τη μελέτη της υπέρυθρης ακτινοβολίας ενώ μέχρι το 1998 σημαντική πηγή ήταν το ευρωπαϊκό διαστημικό τηλεσκόπιο υπέρυθρης ακτινοβολίας ISO (ESA). Το 2009 εκτοξεύτηκε το τηλεσκόπιο Herschel, το μοναδικό που καλύπτει την περιοχή από 60-670 μm και διαθέτει το μεγαλύτερο πρωτεύον κάτοπτρο που έχει ποτέ τοποθετηθεί σε διαστημικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 3.5 μέτρων.
- Διαστημικό Τηλεσκόπιο ASTRO-F (JAXA): Τέθηκε το 2007 σε λειτουργία και στόχο έχει να χαρτογραφήσει ολόκληρο τον ουρανό στο υπέρυθρο.
- IUE - Διεθνής Εξερευνητής Υπεριώδους (ESA, NASA, UK): Λειτουργήσε από το 1978 έως το 1996, κάνοντας σημαντικές παρατηρήσεις στο υπεριώδες μέρος του φάσματος.
- Παρατηρητήριο Ακτίνων  $\gamma$  Compton (NASA): Το δεύτερο μεγάλο διαστημικό τηλεσκόπιο που εκτοξεύτηκε το 1991 και μέχρι το 2000 ήταν η κύρια πηγή παρατήρησης ακτίνων  $\gamma$ . Εξίσου σημαντικό είναι το INTEGRAL (INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) και ο δορυφόρος HETE (High Energy Transient Explorer) για αναζήτηση εκλάμψεων ακτίνων  $\gamma$ .

- Παρατηρητήριο WMAP το οποίο από το 2001 μετρά την ανισοτροπία της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου σε όλο τον ουρανό προκειμένου να αποκαλύψει τις συνθήκες που επικρατούσαν στα πρώτα στάδια δημιουργίας του Σύμπαντος (διαδέχθηκε το COBE). Στη μελέτη του γαλαξία μας αλλά και άλλων γαλαξιών καθώς και στη κατανόηση της φύσης της σκοτεινής ύλης στο διάστημα στοχεύει και το τελευταίο διαστημικό τηλεσκόπιο Planck που εκτοξεύτηκε μαζί με το Herschel το 2009.

Επιπλέον σημαντικά διαστημικά τηλεσκόπια αποτελούν το SOHO (ESA) που μελετά τον Ήλιο και ο Οδυσσέας που εξερευνά το περιβάλλον του Ήλιου εκατέρωθεν των πόλων του καθώς και ο Hipparcos (ESA), παρατηρητήριο μέτρησης της αστρικής παράλλαξης πάνω από 118000 αστέρων του Γαλαξία.

Επίσης σημαντικά είναι τα τηλεσκόπια ανίχνευσης κοσμικής ακτινοβολίας δηλαδή της σωματιδιακής ροής τα οποία αποτελούνται από διατάξεις πολλών ανιχνευτών (Solar Neutrino Experiment) και σχεδιάζονται τηλεσκόπια για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων (Laser Interferometer Space Antenna, LISA).

## 4.2 Γενικά χαρακτηριστικά των οπτικών τηλεσκοπίων

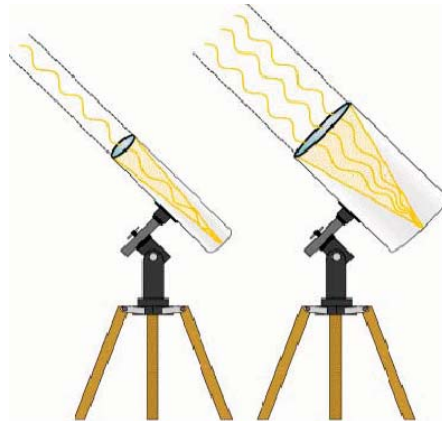
Τα τηλεσκόπια εξυπηρετούν δύο βασικούς σκοπούς:

1. Την ανίχνευση και συλλογή του φωτός από αμυδρά αντικείμενα.
2. Την ικανότητα να διακρίνουν τις λεπτομέρειές τους.

Κατά δεύτερο λόγο εξυπηρετούν την μεταφορά του φωτός σε καταγραφικές διατάξεις όπως είναι η φωτογραφική πλάκα, οι ανιχνευτές συζευγμένου φορτίου (CCD), ο φασματογράφος για την καταγραφή του φάσματος και τη μεγέθυνση των αντικειμένων με τη βοήθεια ενός μεγεθυντικού φακού που λέγεται προσοφθάλμιος.

Τα κύρια οπτικά στοιχεία ενός τηλεσκοπίου είναι:

1. η διάμετρος του κύριου συλλεκτικού οπτικού του στοιχείου,
2. Το εστιακό μήκος ή εστιακή απόσταση  $F$ ,
3. ο εστιακός λόγος και
4. ο προσοφθάλμιος φακός.



Σχήμα 4.2: Δύο τηλεσκόπια διαφορετικών διαμέτρων.

#### 4.2.1 Η διάμετρος του κύριου συλλεκτικού οπτικού στοιχείου

Η διάμετρος (άνοιγμα) ( $D$ ) του κύριου συλλεκτικού οπτικού του στοιχείου (φακού ή κατόπτρου), αποτελεί και το σημαντικότερο στοιχείο αφού καθορίζει τη συλλεκτική ικανότητα φωτός του τηλεσκοπίου που είναι ανάλογη του  $D^2$  (σχήμα 4.2). Η διάμετρος συνήθως εκφράζεται σε ίντσες (1 ίντσα=2.54 cm). Η συλλεκτική ικανότητα ενός τηλεσκοπίου 2 m σε σχέση με αυτή ενός τηλεσκοπίου 1 m είναι  $(2m/1m)^2 = 4$ , δηλαδή είναι τετραπλάσια.

#### 4.2.2 Το εστιακό μήκος ή εστιακή απόσταση $F$

Είναι η απόσταση πίσω από τον αντικειμενικό φακό ή το κάτοπτρο στην οποία συγκεντρώνονται οι παράλληλες δέσμες φωτός από ένα μακρινό αντικείμενο στην κύρια εστία του φακού ή του κατόπτρου, όπου σχηματίζεται και το είδωλο του αντικειμένου (πραγματικό και ανεστραμμένο). Δεν θα πρέπει να συγχέεται με το μήκος του σωλήνα του τηλεσκοπίου γιατί τα σύγχρονα συμπαγή τηλεσκόπια αν και έχουν μικρό μήκος σωλήνα έχουν μεγάλη εστιακή απόσταση.

#### 4.2.3 Ο εστιακός λόγος

Εκφράζεται ως το πηλίκο της εστιακής απόστασης του αντικειμενικού φακού ή κατόπτρου  $F$  δια της διαμέτρου του  $D$ , δηλαδή

$$f = \frac{F}{D}, \quad (4.1)$$

και συμβολίζεται ως  $f/$ . Για παράδειγμα εάν  $D = 16$  ίντσες ( $\simeq 40\text{ cm}$ ) και  $F = 252\text{ cm}$ , ο εστιακός λόγος είναι  $f/6.3$ .

Ο εστιακός λόγος αποτελεί μία σημαντική παράμετρο του τηλεσκοπίου γιατί από αυτήν εξαρτάται η ανάλυση των λεπτομερειών μιας εκτεταμένης αστρονομικής πηγής. Εάν θεωρήσουμε δύο διακριτά σημεία μιας τέτοιας πηγής, το ένα επί του οπτικού άξονα του φακού διαμέτρου  $D$  και το άλλο υπό γωνία  $\theta$  (σχήμα 4.3) τότε εάν τα είδωλά τους σχηματίζονται σε πέτασμα τοποθετημένο στο εστιακό επίπεδο του φακού θα απέχουν μεταξύ τους απόσταση

$$x_1 = F \tan \theta, \quad (4.2)$$

ή για μικρές γωνίες

$$x_1 \simeq F\theta. \quad (4.3)$$

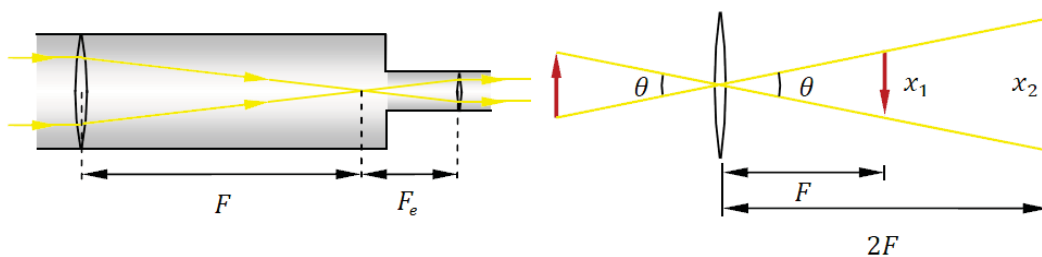
Τα ίδια σημεία παρατηρούμενα μέσα από φακό της ίδιας διαμέτρου  $D$  αλλά διπλάσιας εστιακής απόστασεως  $2F$  θα σχηματίζονταν τα είδωλά τους σε απόσταση το ένα από το άλλο

$$x_2 \simeq 2F, \quad (4.4)$$

και άρα η αποτύπωσή τους σε μία φωτογραφική πλάκα τοποθετημένη στο εστιακό του επίπεδο θα υπερέιχε από απόψεως ευκρίνειας λεπτομέρειας. Στην πρώτη περίπτωση αν υποθέσουμε ότι  $D = F$  ο εστιακός λόγος του τηλεσκοπίου είναι  $f/1$  ενώ στη δεύτερη  $f/2$ . Αυξανόμενου δηλαδή του εστιακού λόγου ενός τηλεσκοπίου επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευκρίνεια στην καταγραφή λεπτομερειών.

Με τον τρόπο όμως αυτό η φωτογραφική πλάκα στην δεύτερη περίπτωση δέχεται λιγότερη φωτεινή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου εκθέσεως  $t_{\text{σρριπτσιζεεκθ}}$  για την επίτευξη της καταγραφής της πληροφορίας (δηλαδή  $t_{\text{εκθ}} \propto f^2$  όπως και στις φωτογραφικές μηχανές).

Μία χρήσιμη παράμετρος είναι η κλίμακα του ειδώλου η οποία εκφράζει το πόσα δεύτερα λεπτά του τόξου στον ουράνιο θόλο αντιστοιχούν σε  $1\text{ mm}$  της



Σχήμα 4.3: Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός οπτικού τηλεσκοπίου.

φωτογραφικής πλάκας. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι

$$x \simeq F\theta_{\text{rad}} = F \frac{\theta''}{206\,265}, \quad (4.5)$$

κι άρα

$$\frac{x}{\theta''} \simeq \frac{F}{206\,265}, \quad (4.6)$$

αλλά συνήθως εκφράζεται στην αντίστροφη μορφή ως γωνία/απόσταση οπότε

$$\frac{\theta''}{x} = \frac{206\,265}{F}, \quad (4.7)$$

και αποτελεί πληροφορία απαραίτητη για την μέτρηση των γωνιωδών αποστάσεων μεταξύ των αστρικών αντικειμένων που απεικονίζονται σε αυτήν.

**Παράδειγμα 4.1:** Ένα εκπαιδευτικό τηλεσκόπιο με αντικειμενικό φακό  $D = 14$  ιντσών κι εστιακό λόγο  $f/11$  δηλαδή  $F = 3910\text{ mm}$ , έχει κλίμακα

$$\frac{206\,265''}{3910\text{ mm}} = 52.7''/\text{mm}, \quad (4.8)$$

δηλαδή το είδωλο του Ήλιου ο οποίος έχει γωνιακό μέγεθος  $31'$  θα καταλαμβάνει

$$31' \times \frac{60''}{52.7''/\text{mm}} = 35.3\text{ mm} \quad (4.9)$$

□

Η παραπάνω ανάλυση γεννά αυτόματα το ερώτημα σχετικά με την ελάχιστη γωνία  $\theta$  υπό την οποία δύο σημεία του ουράνιου θόλου μπορούν να απεικονίζονται ως δύο σημεία μέσα από την παρατήρησή τους με ένα συγκεκριμένο τηλεσκόπιο, χωρίς να συγχέονται τα είδωλά τους. Η εν λόγω γωνία δίδεται από την έκφραση

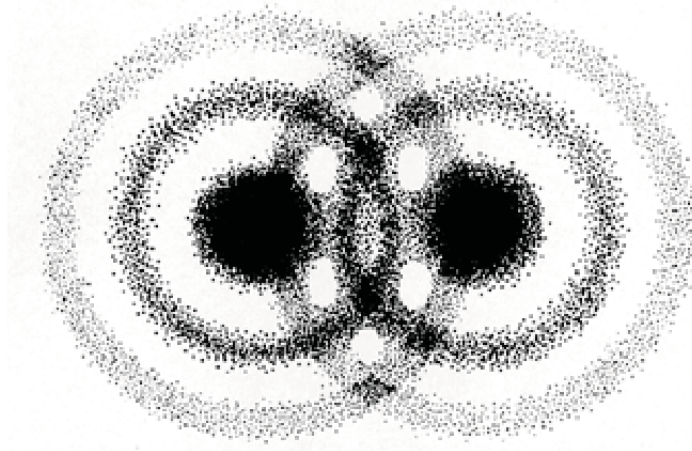
$$\theta'' = 1.22 \frac{\lambda}{D} 206\,265, \quad (4.10)$$

ή

$$\theta'' \simeq 2.5 \times 10^5 \frac{\lambda}{D}. \quad (4.11)$$

και αποτελεί μία από τις χαρακτηριστικότερες παραμέτρους ενός τηλεσκοπίου που ονομάζεται διακριτική ικανότητα. Αυτό το όριο προκύπτει από το γεγονός ότι το είδωλο κάθε σημειακής πηγής σχηματίζει ένα δίσκο περίθλασης στο εστιακό επίπεδο του αντικειμενικού φακού ή κατόπτρο που ονομάζεται δίσκος Airy . Προκειμένου





Σχήμα 4.4: Είδωλο δύο μακρινών σημειακών πηγών μέσα από μία οπή.

να διακρίνονται δύο σημειακές πηγές εφαρμόζεται το κριτήριο Rayleigh στους δίσκους Airy (το πρώτο ελάχιστο του ενός δίσκου Airy να συμπίπτει με το μέγιστο του άλλου) (σχήμα 4.4).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διακριτική ικανότητα ενός τηλεσκοπίου εξαρτάται εκτός από το μέγεθος του τηλεσκοπίου από την ποιότητα των οπτικών του στοιχείων και τις συνθήκες παρατήρησης. Γενικά το ιδανικό όριο, το οποίο είναι γνωστό ως όριο Dawes είναι  $116''/D(mm)$  ή  $4.46''/D(inches)$ . Η διακριτική ικανότητα ενός τηλεσκοπίου  $D = 14$  ιντσών είναι

$$\theta'' = \frac{4.46''}{14} = 0.32''. \quad (4.12)$$

#### 4.2.4 Ο προσοφθάλμιος φακός

Βρίσκεται πίσω από την εστία του αντικειμενικού (προς τον παρατηρητή). Ο προσοφθάλμιος είναι ένας μικρός φακός που μεγεθύνει το πραγματικό είδωλο του αντικειμένου που σχηματίζεται αναστραμμένο στην εστία του και κάνει παράλληλες πάλι τις ακτίνες, επιτρέποντας στον παρατηρητή (ανθρώπινο οφθαλμό) να σχηματίσει μία οξεία εικόνα (είδωλο – εικόνα μεγεθυμένο και φανταστικό). Όλα τα αστρονομικά τηλεσκόπια αναστρέφουν τις εικόνες πάνω – κάτω και από δεξιά στα αριστερά. Εάν  $F_e$  είναι η εστιακή απόσταση του προσοφθάλμιου και του αντικειμενικού φακού, η μεγέθυνση δίνεται από την έκφραση

$$M = \frac{D}{d} = \frac{F}{F_e}, \quad (4.13)$$

κι άρα δεν είναι ιδιότητα που έχει το τηλεσκόπιο από την κατασκευή του αλλά εξαρτάται από τον προσοφθάλμιο που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

**Παράδειγμα 4.2:** Ένα εκπαιδευτικό τηλεσκόπιο με αντικειμενικό φακό  $D = 60 \text{ mm}$  και εστιακό λόγο  $f/12$  είναι εφοδιασμένο με δύο προσοφθάλμιους που χαρακτηρίζονται από τον κατασκευαστή ως  $9 \text{ mm}$  και  $25 \text{ mm}$  αντίστοιχα. Οι αριθμοί 9 και 25 αναφέρονται συμβατικά στην εστιακή τους απόσταση και ως εκ τούτου η χρήση του πρώτου μας διασφαλίζει μεγέθυνση σε σχέση με αυτό που βλέπουμε δια γυμνού οφθαλμού ίση με

$$M = \frac{60 \times 12}{9} = \frac{720}{9} = 80. \quad (4.14)$$

ενώ η χρήση του δευτέρου

$$M = \frac{60 \times 12}{25} = \frac{720}{25} = 28.8. \quad (4.15)$$

□

#### 4.2.5 Ελάχιστη και Μέγιστη ωφέλιμη μεγέθυνση

Η μεγέθυνση θα πρέπει να συνδυάζεται με την ευκρίνεια και οξύτητα του ειδώλου γι αυτό κι έχει κάποιο όριο. Το άνοιγμα της κόρης του ανθρώπινου οφθαλμού έχει διάμετρο περίπου  $5 \text{ mm}$  σε μέτριες συνθήκες φωτισμού και μπορεί να φτάσει από  $2.5 \text{ mm}$  στο φως ημέρας έως και  $8 \text{ mm}$  όταν προσαρμόζεται στο σκοτάδι. Μεγεθύνσεις μικρότερες από την διάμετρο του πρωτεύοντος (σε  $\text{cm}$ ) καταλήγουν σε μία δέσμη φωτός μεγαλύτερη από την κόρη κι άρα απώλεια της φωτεινότητας του ειδώλου. Μεγεθύνσεις μεγαλύτερες από  $10 \times D$  ( $\text{cm}$ ) καταλήγουν σε μικρή δέσμη κι άρα κακής ποιότητας εικόνα.

**Παράδειγμα 4.3:** Ένα τηλεσκόπιο διαμέτρου  $46 \text{ cm}$  με εστιακό λόγο  $f/10$  μπορεί να χρησιμοποιήσει μεγεθύνσεις  $50 \times - 500 \times$ . Αφού το εστιακό μήκος είναι  $460 \text{ cm}$ , μπορεί να χρησιμοποιήσει προσοφθάλμιους περίπου  $10 \text{ mm}$  για μεγέθυνση  $460 \times$  και  $100 \text{ mm}$  για μεγέθυνση  $46 \times$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά οι προσοφθάλμιοι δεν έχουν εστιακό μήκος μεγαλύτερο από  $50 \text{ mm}$ .

□

#### 4.2.6 Οπτικό Πεδίο Τηλεσκοπίου

Επιπλέον ο ρόλος του προσοφθάλμιου είναι ο καθορισμός του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου δηλαδή της γωνιώδους διαμέτρου του ουρανού που παρατηρούμε με

το τηλεσκόπιο. Το πραγματικό οπτικό πεδίο στον ουρανού σε μοίρες είναι αυτό που φαίνεται από τον προσοφθάλμιο μόνο του δηλαδή καθορίζεται από τον τύπο του προσοφθάλμιου και δίνεται από τον κατασκευαστή (συνήθως κυμαίνεται μεταξύ  $45^\circ$  και  $80^\circ$  και είναι γνωστό ως φαινόμενο οπτικό πεδίο  $\alpha$ ) δια της μεγέθυνσης  $M$  που προσδίδει ο προσοφθάλμιος στο τηλεσκόπιο.

**Παράδειγμα 4.4:** Ένας προσοφθάλμιος εστιακού μήκους  $15\text{ mm}$  με πεδίο  $52^\circ$  και μεγέθυνση  $53\times$  δίνει πεδίο

$$\frac{52^\circ}{53} = 0^\circ 58' 52'', \quad (4.16)$$

δηλαδή λίγο μικρότερο από  $1^\circ$ .



## 4.3 Τα είδη των οπτικών τηλεσκοπίων

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες οπτικών τηλεσκοπίων

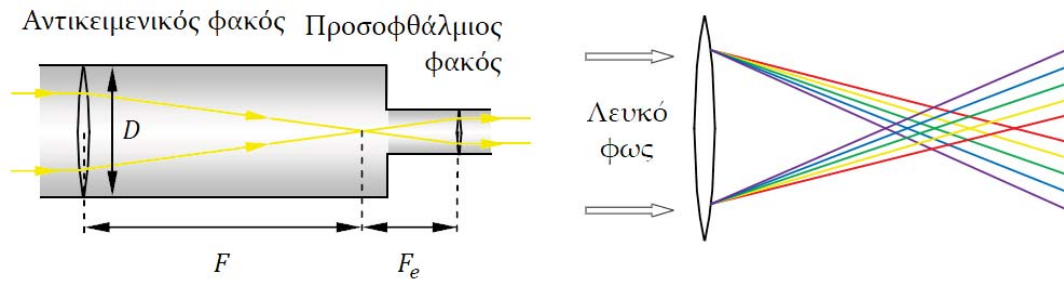
1. Τα διοπτρικά (διαθλαστικά) όπου το φως συλλέγεται από φακούς.
2. Τα κατοπτρικά όπου το φως συλλέγεται από κάτοπτρα.
3. Τα καταδιοπτρικά που αποτελούν συνδυασμό των παραπάνω.

### 4.3.1 Διοπτρικό ή διαθλαστικό τηλεσκόπιο (refractor)

Όπως μαρτυρεί και το όνομά του ένα διαθλαστικό τηλεσκόπιο χρησιμοποιεί το φαινόμενο της διάθλασης της κάμψης δηλαδή του φωτός κατά τη διάδοσή του από το ένα οπτικό μέσο σε ένα άλλο διαφορετικής πυκνότητας, όπως για παράδειγμα από τον αέρα στο γυαλί. Τα πρώτα τηλεσκόπια χρησιμοποίησαν ένα φακό για τη συλλογή του φωτός δηλαδή ήταν διαθλαστικά (σχήμα 4.5). Ο Γαλιλαίος ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε ένα τέτοιο τηλεσκόπιο (μόνο 1-2 ίντσες) για αστρονομική χρήση, για να παρατηρήσει τις φάσεις της Αφροδίτης και τους δορυφόρους του Δία<sup>1</sup>. Το σύγχρονο διαθλαστικό τηλεσκόπιο αποτελείται από ένα σύστημα φακών (κοίλων, κυρτών ή επίπεδων) μέσα σε ένα σωλήνα γύρω από τον αντικειμενικό και από ένα κάτοπτρο κοντά στον σύνθετο προσοφθάλμιο που επιτρέπει την αναστροφή του ειδώλου για πιο άνετη θέση παρατήρησης.

Τα μειονεκτήματα των διαθλαστικών τηλεσκοπίων είναι

<sup>1</sup>Η εφεύρεση του τηλεσκοπίου αποδίδεται στον Ολλανδό Hans Lippershey (1608) που κατασκεύασε ένα σωλήνα, με έναν κοίλο και έναν κυρτό φακό που μπορούσε να μεγεθύνει τα αντικείμενα 3 έως 4 φορές. Ο Γαλιλαίος (1609) σχεδίασε και βελτίωσε δραστικά το αρχικό σχέδιο και το χρησιμοποίησε στην αστρονομία.



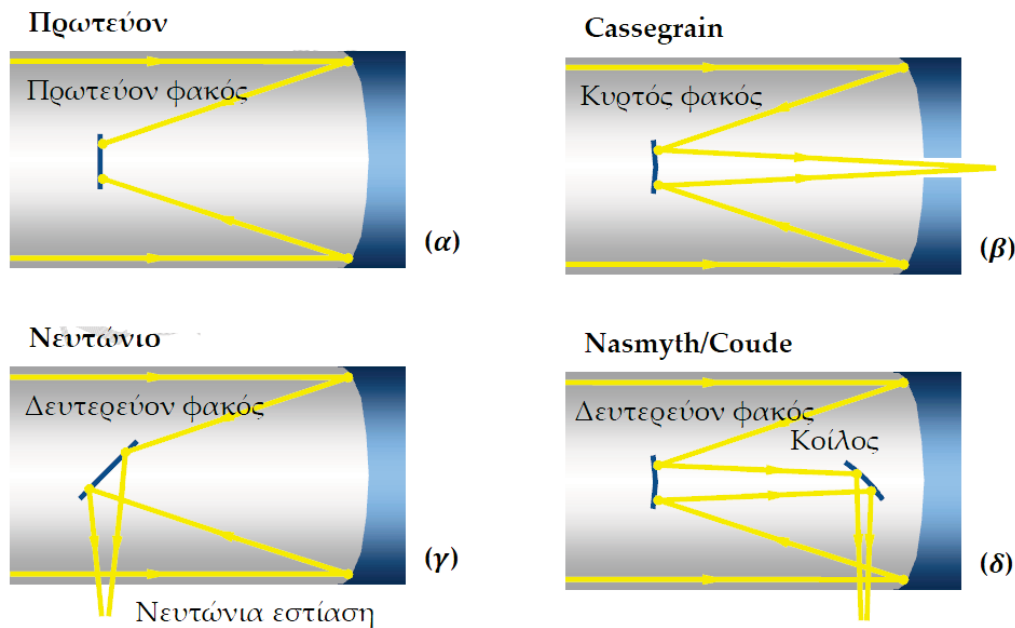
Σχήμα 4.5: **Αριστερά:** Ένα τυπικό διοπτρικό τηλεσκόπιο. **Δεξιά:** Η χρωματική εκτροπή ενός φακού.

1. η δυσκολία κατασκευής φακών μεγάλης διαμέτρου που καμπυλώνουν κάτω από το ίδιο το βάρος τους
2. η δυσκολία στήριξης
3. η απορρόφηση και σκέδαση του φωτός από το γυαλί
4. η χρωματική εκτροπή (ή χρωματικό σφάλμα των φακών) που οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του υλικού του φακού από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος και διαθλλόμενου φωτός με αποτέλεσμα η εστιακή απόσταση να είναι διαφορετική για κάθε μήκος κύματος, γεγονός που προσδίδει πολλές φορές γύρω από το σχηματιζόμενο είδωλο μία άλω ουράνιου τόξου (σχήμα 4.5). Το χρωματικό σφάλμα συνήθως διορθώνεται εν μέρει ή ολικώς από αχρωματικούς ή αποχρωματικούς φακούς (δύο φακούς με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης), μεγαλύτερου όμως κόστους

Λόγω των παραπάνω μειονεκτημάτων το μεγαλύτερο διαθλαστικό τηλεσκόπιο περιορίζεται σε διάμετρο στο αστεροσκοπείο Yerkes στο Wisconsin (1897).

### 4.3.2 Κατοπτρικά ή ανακλαστικά τηλεσκόπια (reflectors)

Το 1668 ο Νεύτωνας βρήκε ένα νέο τρόπο να διορθώσει τη χρωματική εκτροπή και να συλλέγει περισσότερο φως από αμυδρά αντικείμενα, με την αντικατάσταση του αντικειμενικού φακού με ένα κοίλο κάτοπτρο (κύριο ή πρωτεύον) που ανακλά τις προσπίπτουσες ακτίνες και σχηματίζει την εικόνα του αντικειμένου στην κύρια εστία όπου βρίσκεται ο παρατηρητής (ή μια κάμερα) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Το ανακλαστικό τηλεσκόπιο του Νεύτωνα όμως δεν μπορούσε να κατευθύνει όλες τις ακτίνες του φωτός στο ίδιο εστιακό σημείο (σφάλμα σφαιρικής εκτροπής) μέχρι που



Σχήμα 4.6: Τα 4 είδη κατοπτρικών τηλεσκοπίων.

το 1721, ο John Hadley, ένας Άγγλος μαθηματικός, χρησιμοποίησε παραβολικό κάτοπτρο που αντανακλά όλες τις ακτίνες προς το ίδιο σημείο, δημιουργώντας μια καλή, εστιασμένη εικόνα.

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι κατοπτρικών τηλεσκοπίων ανάλογα με τη θέση στην οποία μεταφέρεται η κύρια εστία με τη βοήθεια ενός δευτερεύοντος κατόπτρου (σχήμα 4.6) οι οποίοι επιλέγονται ανάλογα με τη χρήση του τηλεσκοπίου. Έτσι στα μικρά τηλεσκόπια ο πρωτεύον τύπος (σχήμα 4.6.α) δεν είναι εύχρηστος γιατί ο παρατηρητής πρέπει να παρεμβάλλεται στην πορεία των ακτίνων κι άρα να χάνει μέρος της φωτεινής δέσμης. Στα Cassegrain (σχήμα 4.6.β) η φωτεινή δέσμη ανακλάται με τη βοήθεια ενός κυρτού υπερβολοειδούς δευτερεύοντος κατόπτρου το οποίο τοποθετείται πριν την εστία του κύριου κατόπτρου σε μία οπή που υπάρχει στο κέντρο του κύριου κατόπτρου και πίσω από τον οπτικό σωλήνα του τηλεσκοπίου όπου μπορούν να τοποθετηθούν οι ανιχνευτές ή ο προσοφθάλμιος. Αυτό το σχεδιασμό ακολουθούν πολλά από τα μεγάλα τηλεσκόπια καθώς και το HST. Τα περισσότερα εμπορικά τηλεσκόπια είναι Νευτώνεια (σχήμα 4.6.γ) και παρεμβάλλουν ένα μικρό επίπεδο δευτερεύον κάτοπτρο υπό γωνία  $45^\circ$  το οποίο εκτρέπει τις ακτίνες σε ένα προσοφθάλμιο φακό στο πλαϊνό μέρος του σωλήνα του τηλεσκοπίου. Ο Νευτώνιος τύπος επιλέγεται και για μεγάλα τηλεσκόπια (διάμετρος κατόπτρου μεγαλύτερη από 2 m) γιατί περιέχει το μικρότερο αριθμό οπτικών στοιχείων που

παρεμβάλλονται στην πορεία του φωτός και μπορούν να επιφέρουν παραμορφώσεις.

Όταν για την ανίχνευση φωτός χρησιμοποιείται ένα βαρύ όργανο όπως μία κάμερα CCD, αυτή τοποθετείται στην εστία Cassegrain και για ακόμα βαρύτερα όργανα (φασματογράφος) το φως ανακλάται με ένα βοηθητικό τρίτο κάτοπτρο σε ξεχωριστούς σταθερούς χώρους του τηλεσκοπίου (σχεδίαση Coude, σχήμα 4.6.δ).

Η κατασκευή όμως πολύ μεγάλων κατόπτρων περιορίζεται από την παραμόρφωση του ίδιου του υλικού τους γι αυτό και τα ανακλαστικά περιορίζονται σε διάμετρο πρωτεύοντος κατόπτρου 8 m. Το μεγαλύτερο μονολιθικό (με ένα κάτοπτρο) ανακλαστικό τηλεσκόπιο είναι το LBT (Large Binocular Telescope) διαμέτρου 8.4 m και τα δίδυμα τηλεσκόπια Keck αποτελούν τα μεγαλύτερα του κόσμου χρησιμοποιώντας τεχνολογία σύνθεσης (segmented) του πρωτεύοντος ώστε να συνιστούν ένα κάτοπτρο των 10.8 m (βλ. παράγραφο 4.6).

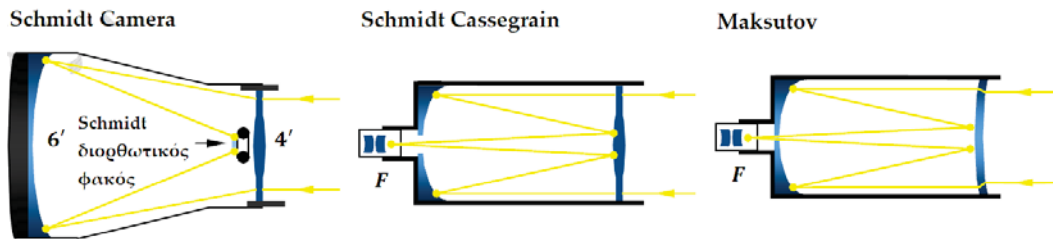
Αν και τα κάτοπτρα δεν εμφανίζουν χρωματική εκτροπή, εμφανίζουν άλλα σφάλματα που είναι

1. **Σφαιρική εκτροπή** (Spherical aberration) – όταν η φωτεινή δέσμη δεν εστιάζεται σε ένα σημείο λόγω της διαφορετικής εστιακής απόστασης του ανακλώμενου φωτός από το κέντρο και τα άκρα του πρωτεύοντος κατόπτρου (ή φακού) λόγω απόκλισης από την σωστή καμπυλότητά του. Αυτό το σφάλμα έχει ως αποτέλεσμα οι αστέρες να φαίνονται ως θολοί δίσκοι. Από το σφάλμα της σφαιρικής εκτροπής διορθώθηκε και το HST (1998).
2. **Αστιγματισμός** – όταν το κάτοπτρο δεν είναι συμμετρικό ως προς το κέντρο του. Εάν για παράδειγμα έχει ωοειδές σχήμα τότε το είδωλο εστιάζεται σε σταυρό παρά σε σημεία.
3. **Κόμη** – οι αστέρες που βρίσκονται κοντά στην άκρη του πεδίου φαίνονται επιμηκυμένοι – όπως οι κομήτες – ενώ αυτοί στο κέντρο φαίνονται σαν φωτεινά σημεία.

Επιπλέον όλα τα ανακλαστικά τηλεσκόπια έχουν απώλειες λόγω της παρεμβολής του δευτερεύοντος κατόπτρου (περίπου 10% της φωτεινής δέσμης) και λόγω ατελειών της ανακλαστικής επίστρωσής τους. Χρησιμοποιώντας παραβολικά κάτοπτρα περιορίζεται το σφάλμα της σφαιρικής εκτροπής, αλλά παραμένουν τα υπόλοιπα σφάλματα (κόμη, αστιγματισμός και παραμόρφωση πεδίου) γι αυτό τα μεγάλα τηλεσκόπια χρησιμοποιούν ένα διορθωτικό σύστημα φακών σε μικρή απόσταση από την κύρια εστία (prime focus corrector). Τα περισσότερα τηλεσκόπια χρησιμοποιούν ένα σύστημα τριών φακών ενώ αυτά που χρησιμοποιούν κάτοπτρα υδραργύρου χρησιμοποιούν σύστημα τεσσάρων στοιχείων για να διορθώνουν την παραμόρφωση.

### 4.3.3 Καταδιοπτρικά τηλεσκόπια

Για μεγαλύτερα πεδία υπάρχουν τα καταδιοπτρικά τηλεσκόπια που συνδυάζουν σφαιρικά κάτοπτρα και φακούς (ή σύνθετο φακό από διαφορετικά υλικά) για να εστιάσουν



Σχήμα 4.7: Οι 3 τύποι καταδιοπτρικών τηλεσκοπίων.

το φως στο πρωτεύον κάτοπτρο το οποίο στη συνέχεια ανακλάται στο δευτερεύον και διορθώνεται από φακό. Χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες τα Schmidt, τα Schmidt-Cassegrain και τα Maksutov από το όνομα των σχεδιαστών τους (σχήμα 4.7). Τα πρώτα φέρουν το όνομα του κατασκευαστή τους και της φερόνυμης κάμερας που κατασκεύασε για το Palomar (1930) με την προσθήκη ενός διορθωτικού φακού (παχύτερου στο μέσο απ' ότι στην άκρη) στην είσοδο του σφαιρικού πρωτεύοντος κατόπτρου του τηλεσκοπίου για διορθώσει το σφάλμα της σφαιρικής εκτροπής και να καλύψει την ανάγκη ενός πολύ ευρέος οπτικού πεδίου. Το αποτέλεσμα θυμίζει ένα κλασικό Cassegrain εκτός από το γεγονός ότι ο διορθωτικός φακός έχει πολύ μεγάλη καμπυλότητα ώστε να αναγκάζει το κάτοπτρο πίσω του να είναι φορές μεγαλύτερο του αλλά και δεν υπάρχει οπή στον πρωτεύοντα και ο δευτερεύον έχει αντικατασταθεί από φωτογραφική πλάκα (σχήμα 4.8).

Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι

1. Ο συμπαγής σχεδιασμός τους και το μεγάλο εστιακό μήκος σε μικρό οπτικό σωλήνα. Με τη συνεχή ανάκλαση των ακτίνων μέσα σε έναν οπτικό σωλήνα για παράδειγμα τέσσερις φορές μικρότερο από ένα κατοπτρικό ή διοπτρικό, μπορεί να επιτευχθεί η ίδια εστιακή απόσταση.
2. Το μεγάλο πεδίο οράσεως (πολλές τετραγωνικές μοίρες) σε σχέση με τα κατοπτρικά ή διοπτρικά που όσο μεγαλύτερα είναι τόσο περιορισμένο οπτικό πεδίο έχουν.

Μία παραλλαγή αποτελεί το Schmidt-Cassegrain, το οποίο χρησιμοποιεί ένα σφαιρικό πρωτεύον κάτοπτρο με διορθωτικό φακό Schmidt και στη συνέχεια ένα μικρότερο δευτερεύον κάτοπτρο στο μπροστινό μέρος που ανακλά το φως σε μία Cassegrain εστία. Τα Maksutov χρησιμοποιούν σφαιρικά πρωτεύοντα κάτοπτρα και δευτερεύοντα που πολλές φορές αποτελούν μέρος του διορθωτικού φακού που έχει το σχήμα μηνίσκου μεγάλης καμπυλότητας και δίνουν τη δυνατότητα ακόμη μεγαλύτερης συμπίεσης του οπτικού δρόμου.

#### 4.3.4 Στήριξη των τηλεσκοπίων

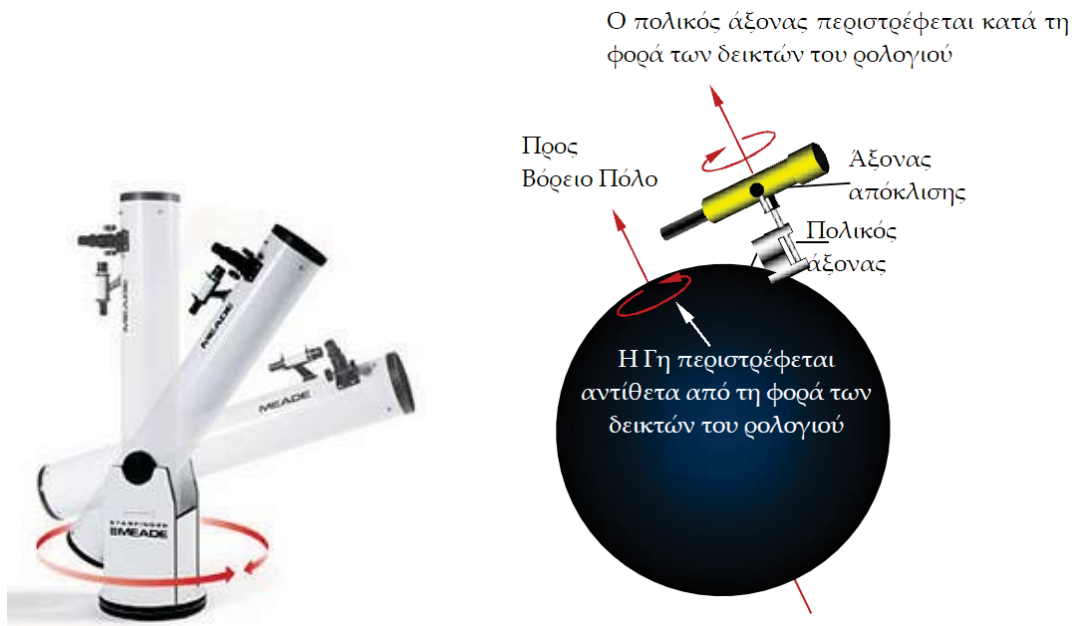
Η βάση στήριξης ενός τηλεσκοπίου αποτελεί πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του (σχεδόν ισοδύναμη σε σημασία με τα οπτικά του στοιχεία) αφού του επιτρέπει τόσο να κινείται ελεύθερα και να στοχεύει τα ουράνια αντικείμενα όσο και να ακολουθεί τις κινήσεις τους ώστε να παραμένουν ακίνητα στο οπτικό του πεδίο. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι στήριξης:

1. **Αλταζιμουθιανή στήριξη:** Σε αυτή τη στήριξη ο ένας άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφος ώστε να επιτρέπει την περιστροφή γύρω από τον άξονα του αζιμούθιου (αριστερά-δεξιά) ενώ ο άλλος είναι οριζόντιος ώστε να επιτρέπει την περιστροφή κάθετα (πάνω-κάτω) καθ' ύψος στον άξονα του γεωγραφικού πλάτους. Πρόκειται για οικονομικότερη στήριξη αλλά πιο πολύπλοκη και χρειάζεται έλεγχο μέσω υπολογιστή για μεγαλύτερους στόχους αφού απαιτείται μετακίνηση σε δύο άξονες ταυτόχρονα για την παρακολούθηση της θέσης των αστέρων. Μια αλταζιμουθιανή στήριξη είναι και η Dobsonian που χρησιμοποιείται σε μερικά νευτώνεια μεγάλης διαμέτρου.
2. **Ισημερινή στήριξη:** Σε αυτή τη στήριξη ο ένας άξονας (πολικός) είναι κεκλιμένος παράλληλα με τον άξονα περιστροφής της Γης οπότε η κίνηση γύρω από αυτόν τον άξονα ακολουθεί την πορεία των αστέρων (σχήμα 4.9). Ο δεύτερος άξονας (άξονας απόκλισης) είναι κάθετος στον άξονα περιστροφής. Κατασκευαστικά είναι δυσκολότερο σύστημα αλλά είναι πιο εύχρηστο. Τα



Σχήμα 4.8: Ο Edwin Hubble στο 48 ιντσών τηλεσκόπιο του Palomar.





Σχήμα 4.9: **Αριστερά:** Η αλταζιμουθιανή στήριξη ενός τηλεσκοπίου. **Δεξιά:** Η ισημερινή στήριξη ενός τηλεσκοπίου

περισσότερα τηλεσκόπια χρησιμοποιούν ισημερινή στήριξη αλλά τα μεγαλύτερα την αλταζιμουθιανή. Γνωστή είναι η Γερμανική ισημερινή ή η ισημερινή με φουρκέτα η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε τηλεσκόπια Schmidt Cassegrain με την οποία το τηλεσκόπιο στηρίζεται ανάμεσα στις δύο άκρες μιας διχάλας η οποία βρίσκεται και αυτή σε κεκλιμένο άξονα.

Τα τηλεσκόπια με ισημερινή στήριξη διαθέτουν δύο κύκλους ρύθμισης γύρω από τους άξονες περιστροφής, με τους οποίους γίνεται η πλοήγηση στις ουράνιες συντεταγμένες. Τα σύγχρονα όμως τηλεσκόπια διαθέτουν GPS (Global Positioning System) στη στήριξη και με τη σκόπευση τριών εμφανών ουράνιων αντικειμένων (κεντραρισμένων στον προσοφθάλμιο) κάνουν ευθυγράμμιση οπότε κινούνται αυτόματα προς τον στόχο ο οποίος επιλέγεται από μία βάση δεδομένων.

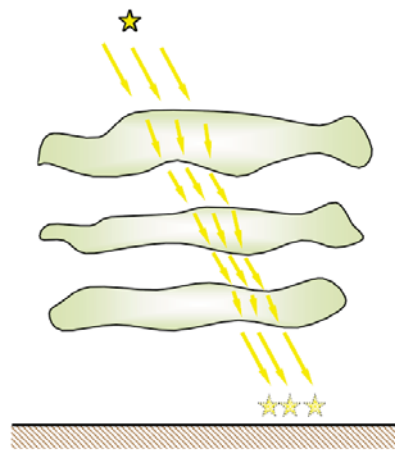
## 4.4 Ατμοσφαιρικές διαταραχές

Η διακριτική ικανότητα των επίγειων τηλεσκοπίων περιορίζεται είτε λόγω της επιρροής εξωτερικών παραγόντων (κραδασμοί, άνεμοι, μεταβολή θερμοκρασίας) είτε λό-

γω της μεσολάβησης της ατμόσφαιρας στην πορεία των φωτεινών ακτίνων. Τα σύγχρονα μεγάλα τηλεσκόπια χρησιμοποιούν κάτοπτρα μικρού πάχους και μεγάλης διαμέτρου που τα κάνει εύκαμπτα κι άρα ευαίσθητα σε μεταβολές της καμπυλότητάς και της ευθυγράμμισής τους είτε λόγω του βάρους τους είτε λόγω φυσικών φαινομένων (μεταβολές θερμοκρασίας, άνεμοι). Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετώπιζαν οι κατασκευαστές ήταν ότι όσο μεγαλύτερο είναι το κάτοπτρο τόσο ισχυρότερη τάση έχει να παραμορφώνεται καθώς περιστρέφεται. Γι αυτό έχουν ενσωματωμένα συστήματα αισθητήρων που παρακολουθούν την παραμόρφωσή τους και τη διορθώνουν (ενεργός οπτική) φτάνοντας σε διακριτική ικανότητα έως και υπό ιδανικές συνθήκες παρατήρησης.

Ακόμα όμως κι ένα μεγάλης διαμέτρου επίγειο τηλεσκόπιο τέλειο κατασκευαστικά δε θα μπορεί να έχει πολύ καλύτερη γωνιακή διακριτική ικανότητα από ένα μικρότερο λόγω ατμοσφαιρικής διαταραχής. Κάθε στρώμα της ατμόσφαιρας λόγω των διαφορετικών συνθηκών χαρακτηρίζεται από το δικό του δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα η φωτεινή δέσμη να κάμπτεται σε διαφορετικές γωνίες μέχρι να φτάσει στη Γη. Επιπλέον η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε διαρκή κίνηση (τυρβώδη) αφού κάθε στρώμα αέρα σε διαφορετικό ύψος κινείται με διαφορετική ταχύτητα οπότε και το ποσό διάθλασης της φωτεινής δέσμης σε κάθε στρώμα διαρκώς μεταβάλλεται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η μετακίνηση του αστρικού ειδώλου. Το φαινόμενο εντείνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της ατμόσφαιρας που παρεμβάλλεται, γι αυτό και τα οπτικά τηλεσκόπια βρίσκονται στις κορυφές υψηλών βουνών (σχήμα 4.10).

Η ποιότητα των αστρονομικών παρατηρήσεων που οφείλεται σε αυτήν χαρακτηρίζεται από το αστρονομικό seeing της δεδομένης νύχτας και καθορίζει τον κύκλο μέσα στον οποίο διασπείρεται το φως μιας σημειακής πηγής. Χωρίς την εφαρμογή



Σχήμα 4.10: Η μετακίνηση των αστρικών ειδώλων λόγω ατμοσφαιρικών διαταραχών.

ιδιαίτερης τεχνικής το σύνηθες παρατηρησιακό όριο είναι για μια καλή νύχτα και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες της κορυφής βουνών οι οποίες επιλέγονται για τα σύγχρονα τηλεσκόπια όπως είναι το Ευρωπαϊκό Βόρειο Αστεροσκοπείο στις Άνδεις (Χιλή). Προς αποφυγή της ατμοσφαιρικής επίδρασης τοποθετήθηκε το 1990 το Διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble των 2.4 m στο διάστημα επιτυγχάνοντας γωνιακή διακριτική ικανότητα 0.05 arcsec. Το Hubble αναμένεται να το διαδεχθεί το 2010-2012 το Διαστημικό τηλεσκόπιο James Webb με κάτοπτρο (πτυσσόμενο για να μεταφερθεί) διαμέτρου 6 μέτρων.

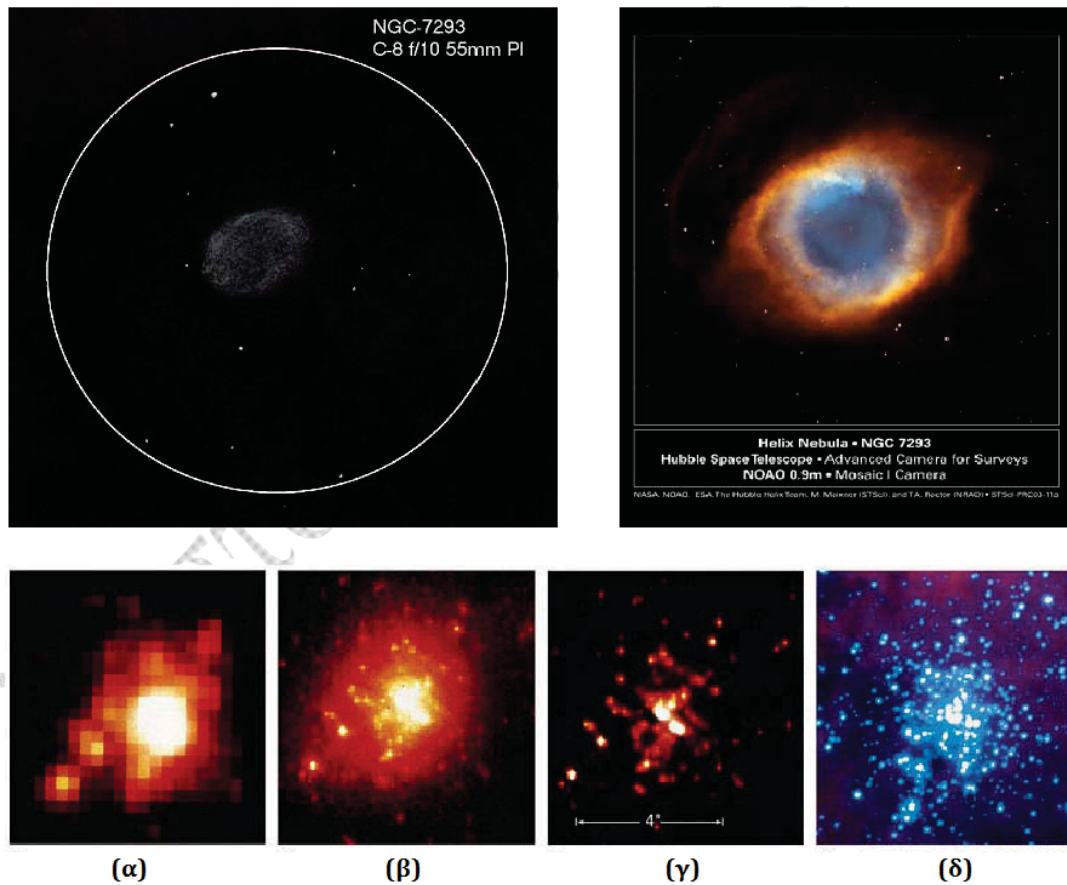
Με την είσοδο ενός μικρού ευμετάβλητου κατόπτρου στη διαδρομή του φωτός μέσα στο τηλεσκόπιο ή ξεχωριστά πίσω από την εστία του μετράται (με τη βοήθεια μικρών εμβόλων) η παραμόρφωση που επιφέρει η γήινη ατμόσφαιρα και εφαρμόζονται οι κατάλληλες διορθώσεις (αντίστροφη παραμόρφωση) ώστε να επιτυγχάνεται την καλύτερη δυνατή αποκατάσταση της αστρικής εικόνας επανέρχεται στην ίδια κατάσταση (πληροφορία) που είχε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα πριν την είσοδό του στην ατμόσφαιρα προσαρμοστική οπτική). Για την ακρίβεια της μεθόδου απαιτείται η παρακολούθηση μιας φωτεινής πηγής κοντά στο παρατηρούμενο αντικείμενο κι επειδή αυτό δεν είναι πάντα εφικτό (για μικρά πεδία) χρησιμοποιούνται τεχνητές φωτεινές πηγές με laser (90 km πάνω από την επιφάνεια της Γης).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για να περιοριστεί παραμόρφωση από το βάρος των μεγάλων κατόπτρων στα σύγχρονα τηλεσκόπια σχηματίζεται μία μεγάλη συλλεκτική επιφάνεια με τη χρήση μικρότερων επιμέρους κατόπτρων ενώ ακόμα πιο πρωτοποριακή υπήρξε η κατασκευή υγρών κατόπτρων από υδράργυρο.

## 4.5 Καταγραφή εικόνας

Οι αστρονομικές παρατηρήσεις απαιτούν πάντα τη σύζευξη του τηλεσκοπίου με ένα κατάλληλο ανιχνευτικό σύστημα. Έτσι για άμεση οπτική παρατήρηση απαιτείται η σύζευξη τηλεσκοπίου-οφθαλμού, όπως φαίνεται από το σχέδιο του νεφελώματος Helix όπως αυτό φαίνεται στον προσοφθάλμιο του τηλεσκοπίου ενώ για την καταγραφή της παρατηρούμενης εικόνας απαιτείται η σύζευξη τηλεσκοπίου-φωτογραφικής κάμερας ή κάμερας CCD η οποία έχει την καλύτερη δυνατή απόκριση σε σχέση με τους άλλους ανιχνευτές, όπως φαίνεται στην εικόνα του ίδιου νεφελώματος (μετά από επιπρόσθεση πολλών εικόνων σε διαφορετικά φίλτρα).

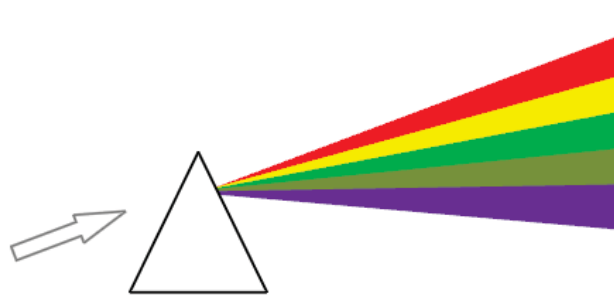
Πέρα από την κλασική μέθοδο της φωτογραφίας με την οποία καταγράφεται μόνο το 5% του φωτός, η πληροφορία (90%) ανιχνεύεται με CCD κάμερα που προσαρμόζεται στην έξοδο του τηλεσκοπίου και αναπαράγεται ηλεκτρονικά μέσω υπολογιστή. Μια κάμερα CCD είναι ένας ανιχνευτής συζευγμένου φορτίου που αποτελείται από διατεταγμένα στοιχεία ημιαγώγιμου υλικού ευαίσθητου στο φως (πυρίτιο) ώστε κάθε φορά που πέφτουν πάνω τους φωτόνια (από τη φωτεινή πηγή) απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (σε αναλογία με τα φωτόνια). Η σύγχρονη μέθοδος επεξεργασίας εικόνας (image processing) καθιστά δυνατή την ανάδειξη των επιμέ-



Σχήμα 4.11: Πάνω: ΤΤΟ νεφέλωμα Helix στο οπτικό (αριστερά) και μετά από επεξεργασία με διάφορα φίλτρα (δεξιά). Κάτω: Το σμήνος *R136* (α) από τη Γη, (β) από το HST πριν τη διόρθωση και χωρίς επεξεργασία, (γ) από το HST μετά την επεξεργασία και (δ) μετά τη διόρθωσή του.

ρους χαρακτηριστικών των αστρονομικών αντικειμένων όπως φαίνεται συγκριτικά στην απεικόνιση του σμήνους *R136* από τη Γη (α), (β) από το HST πριν τη διόρθωσή του και χωρίς επεξεργασία εικόνας, (γ) από το HST με επεξεργασία εικόνας και (δ) μετά τη διόρθωσή του (1994).

Για φωτομετρικές παρατηρήσεις (συνολική δηλαδή καταγραφή της ακτινοβολίας) απαιτείται η σύζευξη τηλεσκοπίου-CCD κάμερας και επεξεργασία της εικόνας με ειδικά αστρονομικά λογισμικά πακέτα. Για φασματοσκοπικές παρατηρήσεις που στοχεύουν στη λήψη και την καταγραφή του φάσματος μιας αστρικής πηγής απαιτείται η σύζευξη τηλεσκοπίου-φασματογράφου.



Σχήμα 4.12: Η χρωματική ανάλυση του λευκού φωτός από ένα πρίσμα.

Ένας φασματογράφος χαρακτηρίζεται από ένα στοιχείο διασποράς της ακτινοβολίας, συνήθως πρίσμα ή φράγμα περίθλασης, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ανάλυση του φωτός.

Το πρίσμα παρέχει εν γένει λαμπρότερα φάσματα απ' ότι το φράγμα, λόγω της διασποράς του φωτός από το τελευταίο σε χροσσούς συμβολής. Το φράγμα όμως υπερέχει λόγω του ότι η κλίμακα του μήκους κύματος στα παρατηρούμενα φάσματα είναι γραμμική και μεγαλύτερο μέρος του φωτός φτάνει στον ανιχνευτή και δεν χάνεται από απορροφήσεις και σκεδάσεις πάνω στο πρίσμα. Συνήθως τοποθετείται μία σχισμή στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου με κέντρο το υπό μελέτη αντικείμενο ώστε να φτάνει στο φράγμα ή στο πρίσμα μόνο το φως που περνά από τη σχισμή και έτσι το παρατηρούμενο φάσμα να έχει τη χαρακτηριστική μορφή των κάθετων φασματικών γραμμών σε ένα οριζόντιο υπόβαθρο.

## 4.6 Ραδιοτηλεσκόπια

Τηλεσκόπια υπό την ευρύτερη έννοια υπάρχουν και για την παρατήρηση της ακτινοβολίας στα υπόλοιπα μέρη του φάσματος, ακόμα και για τη μελέτη εξωτικών μορφών ακτινοβολίας όπως είναι τα νετρίνα ή η βαρύτητα. Τα τηλεσκόπια μπορούσαν να δουν μόνο το ορατό φως μέχρι το 1937. Η ραδιοαστρονομία ξεκίνησε από την έρευνα του Karl Jansky το ερευνητή ραδιομηχανικό των Εργαστηρίων Bell, ο οποίος το 1932 ανακάλυψε ότι τα ραδιοκύματα από το διάστημα προκαλούσαν διαταραχές στις μεταδόσεις των τηλεφώνων με αποτέλεσμα να καταγράψει το ραδιοφωνικό υπόβαθρο του κέντρου του Γαλαξία μας. Το 1937, ο Reber κατασκεύασε μια κεραία πλάτους 10 μέτρων και άρχισε τη χαρτογράφηση των ραδιοφωνικών πηγών από το διάστημα. Η ραδιοαστρονομία αναπτύχθηκε ραγδαία μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Επειδή τα ραδιοφωνικά κύματα ανακλώνται από τα μέταλλα, τα ραδιοτη-

λεσκόπια κατασκευάζονται από «πίατα» από αλουμίνιο ή μείγμα ατσαλιού χωρίς περιορισμό διαμέτρου, τα οποία συλλέγουν και εστιάζουν τη ραδιοφωνική ακτινοβολία των αντικειμένων σε δέκτες (κεραίες). Λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος (από  $mm$  έως  $km$ ) για να επιτύχουν την ίδια διακριτική ικανότητα με ένα οπτικό τηλεσκόπιο πρέπει να έχουν πολύ μεγάλη διάμετρο πρωτεύοντος. Γιατο σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κοιλότητα στο έδαφος με διάμετρο 305 μέτρα η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο ραδιοτηλεσκόπιο στο Arecibo της Αμερικής (Puerto Rico).

**Παράδειγμα 4.5:** Ένα οπτικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 100  $cm$  για  $\lambda = 0.5 \mu m$  έχει διακριτική ικανότητα

$$\frac{0.25 \times 0.5}{1} = 0.125 \text{ arcsec}, \quad (4.17)$$

η οποία είναι πολύ καλύτερη από την αντίστοιχη ενός ραδιοτηλεσκοπίου των 25  $m$  στο 1  $m$

$$\frac{0.25 \times 1 \times 10^6}{1} = 10^4 \text{ arcsec}. \quad (4.18)$$

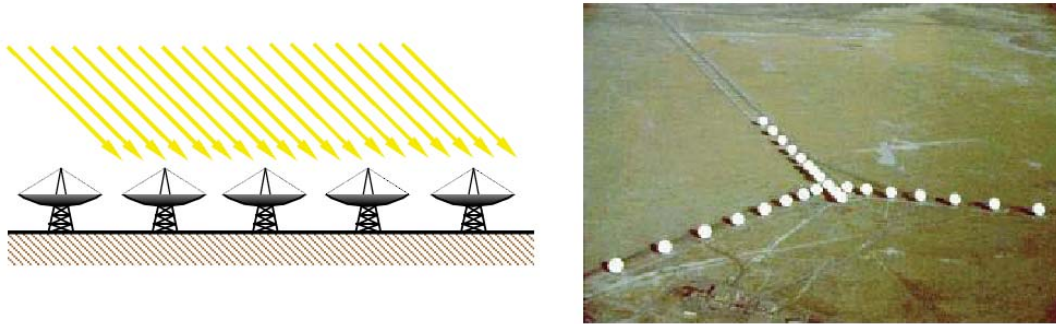
□

Για την επίτευξη καλύτερης διακριτικής ικανότητας χρησιμοποιείται το φαινόμενο της συμβολής όπου με τη χρήση πολλών κεραιών που λειτουργούν συγχρόνως, τη μέτρηση και το συνδυασμό των σχημάτων συμβολής από μακρινές πηγές (σχήμα 4.13), κατασκευάζονται λεπτομερείς χάρτες της ραδιοφωνικής εκπομπής, όπως συμβαίνει με την Πολύ Μεγάλη Διάταξη (Very Long Array, VLA) στο Νέο Μεξικό όπου τα 27 ραδιοτηλεσκόπια διαμέτρου 25 μέτρων βρίσκονται πάνω σε σιδηροδρομικές γραμμές για εύκολη αναδιάταξη σε σχήμα  $Y$  κι έχει διακριτική ικανότητα έως και 0.13 arcsec.

Επέκταση της ίδιας τεχνικής αποτελεί η συμβολομετρική διάταξη 10 ραδιοτηλεσκοπίων μεγέθους 25 μέτρων που καλύπτουν μια έκταση 8 600  $m^2$  σε διαφορετικές ηπέιρους (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) με την οποία επιτυγχάνεται μία πολύ καλή διακριτική ικανότητα της τάξης των 0.001 arcsec. Η τεχνική της συμβολομετρίας χρησιμοποιείται και στα οπτικά τηλεσκόπια.

## 4.7 Τα τηλεσκόπια σύνθετων κατόπτρων

Μετά την κατασκευή του μεγαλύτερου διοπτρικού τηλεσκοπίου Hale των 5  $m$  στο όρος Palomar το 1948 και την παράλληλη ανάπτυξη των υπολογιστών, αναπτύχθηκε η τεχνική της κατασκευής τηλεσκοπίων πολλαπλών κατόπτρων όπως το MMT (Multi Mirror Telescope) στην Αριζόνα (1979) που αποτελείται από έξι κάτοπτρα διαμέτρου 1.8  $m$  σε κοινή βάση, το τηλεσκόπιο των 10 μέτρων Keck I που



Σχήμα 4.13: **Αριστερά:** Μία συμβολομετρική διάταξη ραδιοτηλεσκοπίων. **Δεξιά:** Η διάταξη τηλεσκοπίων VLA.

αποτελείται από 36 εξαγωνικά κάτοπτρα διαμέτρου 1.8 μέτρων σε ενιαία επιφάνεια (1993) και του διδύμου του Keck II με το οποίο συνδέεται με την τεχνική της συμβολομετρίας προκειμένου να αυξηθεί η συλλεκτική και η γωνιακή διακριτική ικανότητα τους (κάτοπτρο μεγέθους ποδοσφαιρικού γηπέδου). Παράλληλα αναπτύχθηκε νέα τεχνολογία κατασκευής μεγάλων ενιαίων κατόπτρων και το MMT αντικαταστάθηκε με το 6.5 μέτρων ενιαίο κάτοπτρο.

Το μεγαλύτερο νέας τεχνολογίας είναι το Large Binocular Telescope (από την ομοιότητά του με κυάλια) με δύο κάτοπτρα των 8.4 m που ισοδυναμούν με ένα ενιαίο των 11.8 m, έχει δει το πρώτο φως στην Αριζόνα και αναμένεται με την τεχνική της συμβολομετρίας να επεκταθεί και να ισοδυναμεί με ενιαίο των 22.8 m.

Την τεχνική της συμβολομετρίας χρησιμοποιεί και το Πολύ Μεγάλο Τηλεσκόπιο (Very Large Telescope, VLT) που συνδυάζει 4 ανεξάρτητα τηλεσκόπια των 8.2 μέτρων στη Βόρεια Χιλή και ισοδυναμεί με ένα ενιαίο διαμέτρου 16.4 m. Αναλυτικά τα μεγαλύτερα οπτικά τηλεσκόπια παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.1, τα περισσότερα είναι συγκεντρωμένα στην κορυφή του ηφαιστείου Mauna Kea στη Χαβάη, σε υψόμετρο 4 200 μέτρα. Τα επόμενα τεράστια σύγχρονα τηλεσκόπια που σχεδιάζονται να κατασκευαστούν παρουσιάζονται στο 4.14 και αναμένεται να δώσουν απαντήσεις στα σύγχρονα αστρονομικά προβλήματα.

## 4.8 Τηλεσκόπια ακτίνων X

Τα τηλεσκόπια των ακτίνων X είναι διαφορετικά από τα οπτικά αφού τα φωτόνια των ακτίνων X δεν ανακλώνται όπως τα οπτικά αλλά λόγω της μεγάλης τους ενέργειας απορροφώνται όταν προσπέσουν στην επιφάνεια ενός κατόπτρου και τη διαπερνούν -

όπως όταν μία σφαίρα εισχωρεί σε ένα τοίχο. Όπως όμως οι σφαίρες όταν χτυπήσουν τον τοίχο υπό γωνία αναπηδούν, έτσι και οι ακτίνες X αναπηδούν όταν προσπέσουν στο κάτοπτρο υπό μικρή γωνία. Γι αυτό το λόγο τα κάτοπτρα των σύγχρονων τηλεσκοπίων ακτίνων X (Chandra) μοιάζουν περισσότερο με γυάλινους κυλίνδρους (ώστε να είναι σχεδόν ευθυγραμμισμένα με τις προσπίπτουσες ακτίνες X) παρά σαν τα πιάτα των κλασικών οπτικών τηλεσκοπίων. Τα κάτοπτρα εστιάζουν τα φωτόνια σε προηγμένους ανιχνευτές οι οποίοι καταγράφουν τη θέση, την ενέργεια των φωτονίων και μετά την ανάλυση των δεδομένων ανασυστήνονται οι εικόνες των ουράνιων αντικειμένων τα οποία τα εξέπεμψαν.

Πίνακας 4.1: Τα μεγαλύτερα οπτικά τηλεσκόπια

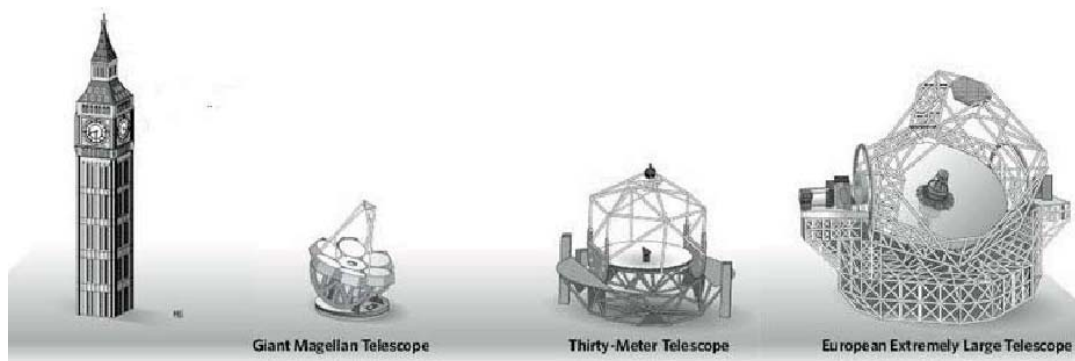
**Όνομα:** Gran Telescopio Canarias

**Διάμετρος:** 10.4 m

**Θέση:** La Palma, Κανάριοι νήσοι, Ισπανία

**Σχόλια:** Αστεροσκοπείο del Roque de los Muchachos, τεχνική πολλαπλών κατόπτρων με βάση το Keck

**Όνομα:** Keck I, Keck II



(α)

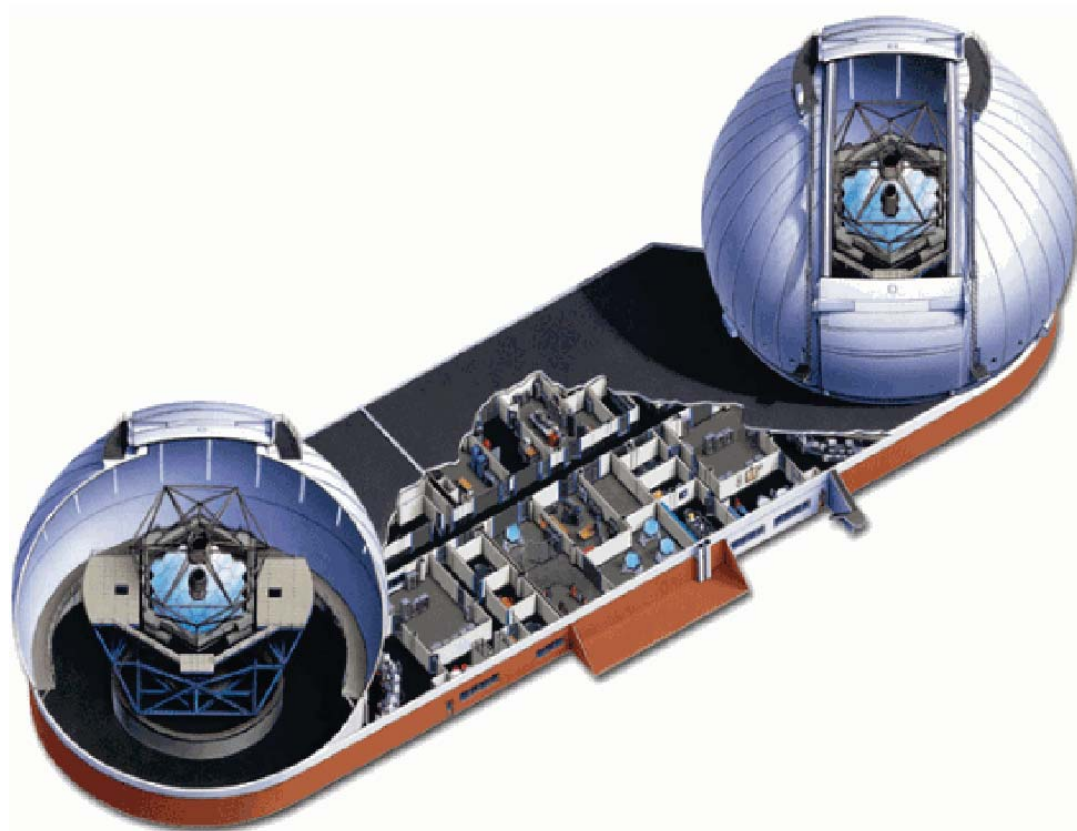
(β)

(γ)

(δ)

Σχήμα 4.14: Τα επόμενα (2010-1017) μεγάλα τηλεσκόπια. (α) Το Γιγάντιο Τηλεσκόπιο Μαγγελάνος των 25.2 m (με 7 κάτοπτρα των 8.4 m), (β) το Τηλεσκόπιο των 30 m με 492 κάτοπτρα των 1.44 m, και (γ) το Ευρωπαϊκό Υπερβολικά Μεγάλο Τηλεσκόπιο των 42 m με 984 κάτοπτρα των 1.45 m. Για λόγους σύγκρισης παρατίθεται και ο πύργος Big Ben ύψους 96.6 m.





Σχήμα 4.15: Τα τηλεσκόπια Keck στο Mauna Kea της Χαβάης.

**Διάμετρος:** 10.0 m

**Θέση:** Κορυφή Ηφαιστείου Mauna Kea, Χαβάη, Ηνωμένες Πολιτείες

**Σχόλια:** Το κάθε κάτοπτρο αποτελείται από 36 εξαγωνικά τμήματα. Ανεξάρτητα τηλεσκόπια αλλά και συνδυασμένα με την τεχνική της συμβολομετρίας.

**Όνομα:** SALT

**Διάμετρος:** 10.0 m

**Θέση:** Αστεροσκοπείο Νότιας Αφρικής

**Σχόλια:** Βασισμένο στο σχέδιο του HET

**Όνομα:** Hobby-Eberly, (HET)

**Διάμετρος:** 9.2 m

**Θέση:** Όρος Fowlkes, Τέξας, Ηνωμένες Πολιτείες

**Σχόλια:** Οικονομικό, τεχνική πολλαπλών κατόπτρων, μόν για φασματοσκοπία.

---

**Όνομα:** Large Binocular Telescope

**Διάμετρος:** 8.4 m

**Θέση:** Όρος Graham, Αριζόνα, Ηνωμένες Πολιτείες

**Σχόλια:** Δύο κάτοπτρα των 8.4 m που ισοδυναμούν με ένα των 11.8 m και διακριτικής ικανότητας ενός κατόπτρου των 23 m

---

**Όνομα:** Subaru

**Διάμετρος:** 8.3 m

**Θέση:** Κορυφή ηφαιστείου Mauna Kea, Χαβάη, Ηνωμένες Πολιτείες

**Σχόλια:** NAOJ

---

**Όνομα:** Antu, Keuyen, Melipal, Yepun

**Διάμετρος:** 8.2 m

**Θέση:** Cerro Paranal, Χιλή

**Σχόλια:** Ξεχωριστά ή συνδυασμένα για το συμβολόμετρο VLT

---

**Όνομα:** Gillet, Gemini South

**Διάμετρος:** 8.1 m

**Θέση:** Κορυφή ηφαιστείου Mauna Kea, Χαβάη, Ηνωμένες Πολιτείες και Cerro Pachon, Χιλή.

**Σχόλια:** Πρόκειται για δύο δίδυμα τηλεσκόπια (Το Gillet ονομάζεται και Gemini North

---

**Όνομα:** MMT, Walter Baade, Landon Clay

**Διάμετρος:** 6.5 m

**Θέση:** Όρος Hopkins, Αριζόνα, Ηνωμένες Πολιτείες το πρώτο και La Serena, Χιλή τα δύο τελευταία.

**Σχόλια:** Το Walter Baade είναι γνωστό και ως Magellan I ενώ το Landon Clay ως Magellan II

---

**Όνομα:** Bolsoi Telescope Azimutalnyi, LZT

**Διάμετρος:** 6.0 m

**Θέση:** Nizshy Arkhyz, Ρωσία και Βρετανική Κολομβία, Καναδάς αντίστοιχα.

**Σχόλια:** Το πρώτο είναι γνωστό ως Large Altazimuth Telescope ενώ το δεύτερο χρησιμοποιεί τεχνολογία υγρού κατόπτρου και «βλέπει» μόνο στο Ζενίθ.

---

**Όνομα:** Hale

**Διάμετρος:** 5.0 m

**Θέση:** Όρος Palomar, Καίφόρνια

---