

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η **Γεωδαιτική Αστρονομία (Geodetic Astronomy)** είναι ο κλάδος της Αστρονομίας Θέσης (Positional Astronomy) που ασχολείται με τον προσδιορισμό διευθύνσεων στον χώρο, από σημεία πάνω ή κοντά στην Φυσική Γήινη Επιφάνεια, χρησιμοποιώντας ουράνια σώματα (συνήθως άστρα) ως στόχους. Επομένως, το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο προέρχεται από την Αστρονομία, ενώ η μεθοδολογία και πρακτική των παρατηρήσεων είναι γεωδαιτικής προέλευσης.

Ο σκοπός της Γεωδαιτικής Αστρονομίας είναι ο προσδιορισμός των αστρονομικών συντεταγμένων ενός τόπου (με στόχο τον προσδιορισμό της απόκλισης της κατακορύφου) και ο αστρονομικός προσανατολισμός μιας διεύθυνσης (π.χ. πλευράς γεωδαιτικού δικτύου).

Τα συστήματα αναφοράς της Γεωδαισίας είναι όλα εντοπισμένα στον χώρο και συνδέονται με την θέση και τις διαστάσεις της Γης. Η συνηθισμένη επιφάνεια αναφοράς είναι ένα ελλειψοειδές, με κέντρο που βρίσκεται, συνήθως, στο κέντρο μάζας της Γης και με καθορισμένα μεγέθη αξόνων, που προσδιορίζονται από τις πραγματικές διαστάσεις της Γης. Η θέση ενός σημείου προσδιορίζεται με **τρεις** συντεταγμένες, είτε ορθογώνιες (καρτεσιανές) (x, y, z) , είτε ελλειπτικές (γεωδαιτικές) συντεταγμένες (λ, φ, h) . Με άλλα λόγια, η θέση κάθε σημείου ορίζεται από ένα *δέσμο διάνυσμα*, με συγκεκριμένο κέντρο και μήκος, ή από την θέση ενός σημείου μιας ελλειψοειδούς επιφάνειας αναφοράς, που έχει συγκεκριμένο κέντρο και διαστάσεις.

Σε αντιδιαστολή με τα παραπάνω, η Γεωδαιτική Αστρονομία ασχολείται αποκλειστικά με διευθύνσεις, δηλαδή *ελεύθερα, μοναδιαία διανύσματα*. Για την περιγραφή τέτοιων διανυσμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορθογώνιες (καρτεσιανές) συντεταγμένες (X, Y, Z) , που έχουν μόνο **δύο** βαθμούς ελευθερίας. Συνήθως χρησιμοποιούνται σφαιρικές συντεταγμένες (Λ, Φ) σε ένα σύστημα που προσανατολίζεται στον χώρο βάσει του **γεωειδούς**, βασίζεται επομένως στο Γήινο πεδίο βαρύτητας. Αυτή η δυνατότητα επιλογής τύπου συντεταγμένων βασίζεται στην ισοδυναμία δύο απειροσυνόλων: του συνόλου όλων των μοναδιαίων διανυσμάτων (που εκφράζουν όλες τις δυνατές διευθύνσεις ευθειών στον χώρο) με το σύνολο των σημείων μιας σφαιρικής επιφάνειας.

Συνεπώς, η επιφάνεια αναφοράς της Γεωδαιτικής Αστρονομίας είναι μία μοναδιαία σφαίρα που μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε και να έχει οποιαδήποτε ακτίνα, την οποία δεχόμαστε ίση με την μονάδα. Αυτή η σφαίρα ονομάζεται παραδοσιακά **ουράνια σφαίρα**. Τα συστήματα αναφοράς, που ορίζονται στην ουράνια σφαίρα, προσανατολίζονται με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της Γης και, ειδικότερα, των διαφόρων κινήσεών της. Με την βοήθεια των συστημάτων αυτών περιγράφεται η θέση σημείων (παρατηρητών) στην Γη, η θέση των ουρανίων σωμάτων και η διεύθυνση παρατήρησης προς αυτά.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται σφαιρικές συντεταγμένες (όπως γίνεται συνήθως στο τεύχος αυτό), για την περιγραφή των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων γεωμετρικών στοιχείων ή συντεταγμένων των συστημάτων αναφοράς χρησιμοποιείται

η Σφαιρική Τριγωνομετρία. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιούνται ορθογώνιες συντεταγμένες, καταλληλότερο μαθηματικό εργαλείο είναι η Γραμμική Άλγεβρα (διανύσματα, πίνακες κλπ).

Επειδή η διεύθυνση παρατήρησης (από την Γη) προς ένα ουράνιο σώμα μεταβάλλεται με τον χρόνο, η εξέταση και χρήση διαφόρων κλιμάκων μέτρησης χρόνου είναι σημαντικό στοιχείο της Γεωδαιτικής Αστρονομίας.

Επίσης, στο τεύχος αυτό γίνεται αναφορά στις διάφορες μεταβολές των τιμών των συντεταγμένων που οφείλονται σε πραγματικές κινήσεις του παρατηρητή ή του παρατηρούμενου σώματος ή σε μεταβολή του προσανατολισμού του συστήματος αναφοράς.

Με βάση τις δυνατότητες του υπάρχοντος εξοπλισμού μετρήσεων και την επιδιωκόμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού συντεταγμένων και προσανατολισμού, που θα εκτεθούν με συντομία στο τεύχος αυτό.

Τέλος, γίνεται μια αναφορά στις βασικές γεωδαιτικές εφαρμογές που απαιτούν την γνώση των 'προϊόντων' της Γεωδαιτικής Αστρονομίας, δηλαδή του αστρονομικού προσανατολισμού μιας διεύθυνσης και της απόκλισης της κατακορύφου.

1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΟΥΡΑΝΙΑ ΣΦΑΙΡΑ

1.1 Βασικές έννοιες

Για τις εφαρμογές της Γεωδαιτικής Αστρονομίας είναι απαραίτητος ο ορισμός συστημάτων συντεταγμένων, στα οποία περιγράφονται οι θέσεις και οι μεταβολές θέσεων (κινήσεις) των σωμάτων. Κυρίως χρησιμοποιούνται το ουράνιο και το γήινο σύστημα που, όπως προδίδει και ο τίτλος τους, αφορούν το μεν πρώτο τα ουράνια αντικείμενα, το δε δεύτερο τα αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης ή κοντά σε αυτήν.

Για τον ορισμό των συστημάτων αυτών χρησιμοποιούνται οι διευθύνσεις που σχετίζονται με τις βασικές κινήσεις της Γης, όπως ο άξονας περιστροφής της Γης. Τα συστήματα αυτά δεν παραμένουν σταθερά στο χρόνο διότι οι διευθύνσεις στις οποίες βασίζονται μεταβάλλονται, λόγω πολλών και διαφορετικών αιτιών. Έτσι ένα θεμελιώδες πρόβλημα, πέρα από την απόδοση συντεταγμένων στα διάφορα αντικείμενα, είναι και η γνώση της μεταβολής στο χρόνο των συστημάτων στα οποία εκφράζονται οι συντεταγμένες. Η γνώση αυτή είναι χρήσιμη για την έκφραση των συντεταγμένων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές αλλά και για την μετατροπή συντεταγμένων από ένα σύστημα σε άλλο.

Για την πληρέστερη κατανόηση των συστημάτων είναι χρήσιμοι οι ακόλουθοι ορισμοί:

Πλαίσιο συντεταγμένων (Coordinate frame) είναι ένα σύνολο (ορθογωνίων) αξόνων συντεταγμένων (ή άλλης γεωμετρικής κατασκευής) ως προς τους οποίους προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου.

Σύστημα συντεταγμένων (Coordinate system) είναι μια μέθοδος έκφρασης της θέσης ενός σημείου ως προς ένα καθορισμένο πλαίσιο συντεταγμένων. Η θέση μπορεί να καθοριστεί με ορθογώνιες ή πολικές συντεταγμένες.

Σύστημα αναφοράς (Reference system) είναι η πλήρης προδιαγραφή για το πώς πρόκειται να διαμορφωθεί ένα σύστημα συντεταγμένων. Καθορίζει την προέλευση και τα θεμελιώδη επίπεδα (ή τους άξονες) του συστήματος συντεταγμένων και περιλαμβάνει, επίσης, το σύνολο των διαδικασιών, αλγορίθμων και σταθερών που απαιτούνται για τον μετασχηματισμό μεταξύ των παρατηρήσεων και των μοντέλων που αφορούν το εν λόγω σύστημα.

Πλαίσιο αναφοράς (Reference frame) είναι ένα σύνολο ευπροσδιόριστων σημείων αναφοράς (fiducial points) και των συντεταγμένων τους, που χρησιμεύει στην πρακτική υλοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος αναφοράς. Οι συντεταγμένες άλλων σημείων μπορούν να προσδιοριστούν κάνοντας διαφορικές μετρήσεις των θέσεων τους ως προς τα σημεία αναφοράς. Ο όρος «πλαίσιο αναφοράς» συχνά χρησιμοποιείται ως συνώνυμος του πλαισίου συντεταγμένων που καθορίζει.

Εποχή αναφοράς (Epoch of reference) είναι μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται οι συντεταγμένες. Η χρήση της εποχής αναφοράς επιβάλλεται από την μεταβολή των συντεταγμένων με την πάροδο του χρόνου, λόγω

διάφορων κινήσεων της Γης. Στην αστρονομία οι εποχές αναφοράς εκφράζονται με βάση την Ιουλιανή Ημερομηνία (Julian Date).

Τα συστήματα αναφοράς πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις, η σημαντικότερη των οποίων είναι η αδρανειακότητα. Ένα σύστημα αναφοράς χαρακτηρίζεται ως αδρανειακό αν σε αυτό ισχύει ο νόμος της αδράνειας (πρώτος νόμος του Νεύτωνα). Με όρους της κλασικής (Νευτώνειας) Φυσικής αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα είναι αδρανειακό όταν σε αυτό ένα σώμα (στο οποίο δεν επιδρά καμία δύναμη) είτε ηρεμεί είτε κινείται ομοιόμορφα (με σταθερή ταχύτητα) κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής. Σύμφωνα με την αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου, όλα τα συστήματα αναφοράς που κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά ως προς ένα αδρανειακό σύστημα είναι και αυτά αδρανειακά.

Ο βασικός λόγος χρήσης ενός αδρανειακού συστήματος είναι ότι σε αυτό οι νόμοι της φυσικής είναι αμετάβλητοι με το χρόνο και είναι απλοί σε διατύπωση.

Για την υλοποίηση ενός συστήματος αναφοράς απαιτείται να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη διαδικασία. Αρχικά πρέπει να επιλεγεί η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται το σύστημα. Η ιδέα αυτή μπορεί π.χ. να είναι ότι οι άξονες του συστήματος παραμένουν ακίνητοι ως προς κάποια μακρινά ουράνια σώματα. Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί η φυσική δομή του συστήματος, η οποία περιλαμβάνει τα σώματα που συμμετέχουν στον ορισμό. Η επιλογή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η δομή που δημιουργείται από τα σώματα αυτά να επαληθεύει τη βασική ιδέα.

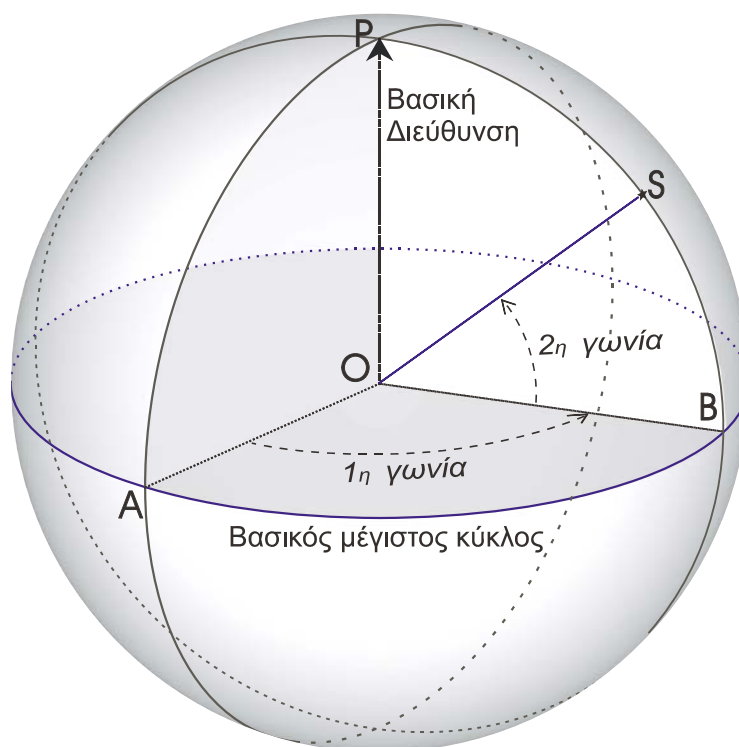
Αφού επιλεγεί η φυσική δομή του συστήματος, πρέπει να αποδοθούν τιμές στις παραμέτρους που το περιγράφουν. Η απόδοση τιμών είναι μια αυθαίρετη διαδικασία και για το λόγο αυτό το μοντέλο που αναπαριστά το σύστημα αναφοράς καλείται συμβατικό σύστημα αναφοράς.

Μετά τη δημιουργία του συμβατικού συστήματος πρέπει να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες ενός αριθμού σημείων από παρατηρήσεις. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός αυτών των σημείων, τόσο καλύτερα υλοποιείται το σύστημα αναφοράς. Τα σημεία αυτά πρέπει να είναι διαθέσιμα προς παρατήρηση, ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός συντεταγμένων νέων σημείων με βάση αυτά. Ο κατάλογος των συντεταγμένων αυτών των σημείων, στα οποία στηρίζεται το σύστημα αναφοράς, καλείται συμβατικό πλαίσιο αναφοράς.

1.2 Αρχές δόμησης ενός συστήματος αναφοράς στην ουράνια σφαίρα

Για τον ορισμό ενός συστήματος αναφοράς στην ουράνια σφαίρα είναι απαραίτητη η γνώση του επιθυμητού προσανατολισμού του στον χώρο. Για τον προσανατολισμό του συστήματος απαιτείται μια συγκεκριμένη διεύθυνση ευθείας στον χώρο ή, ισοδύναμα, η διεύθυνση ενός επιπέδου. Το βασικό στοιχείο του συστήματος είναι ο *μέγιστος κύκλος* που ορίζεται από το επίπεδο αυτό ή που έχει ως *πόλους* το σημείο που αντιπροσωπεύει την συγκεκριμένη διεύθυνση ευθείας και το αντιδιαμετρικό του. Από τους πόλους αυτούς περνούν άπειροι μέγιστοι κύκλοι, όλοι κάθετοι στον βασικό. Ένας από αυτούς επιλέγεται (αυθαίρετα) ως αφετηρία για την μέτρηση της

πρώτης σφαιρικής συντεταγμένης. Ο ορισμός του συστήματος ολοκληρώνεται με τον καθορισμό της μονάδας και της φοράς μέτρησης των συντεταγμένων.



Σχήμα 1.1

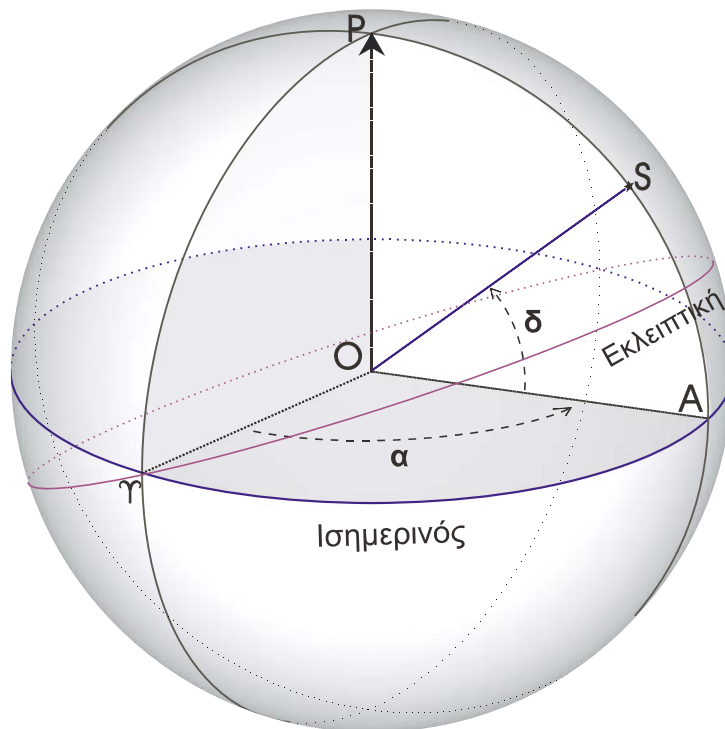
Στο σχήμα 1.1 η βασική διεύθυνση OP ορίζει το επίπεδο του βασικού μέγιστου κύκλου OAB. Ο κάθετος μέγιστος κύκλος OPA επιλέγεται αυθαίρετα ως αφετηρία των μετρήσεων για την πρώτη γωνία (συντεταγμένη). Οι συντεταγμένες της διεύθυνσης OS ορίζονται με τη βοήθεια του δεύτερου κάθετου μέγιστου κύκλου OPB, που περιέχει την διεύθυνση αυτή. Στο σχήμα φαίνεται επίσης η συνήθης φορά μέτρησης κάθε συντεταγμένης.

1.3 Το ουρανογραφικό σύστημα αναφοράς

Το **Ουρανογραφικό Σύστημα Αναφοράς (Celestial Reference System)** χρησιμοποιείται για την περιγραφή της θέσης των ουράνιων σωμάτων. Η βασική διεύθυνση που το ορίζει είναι η διεύθυνση του διανύσματος της *γωνιακής ταχύτητας* περιστροφής της Γης. Η διεύθυνση αυτή καθορίζει μια διάμετρο της ουράνιας σφαίρας που λέγεται και *άξονας του κόσμου*. Παράλληλη με αυτήν είναι η διεύθυνση του πραγματικού άξονα της ημερήσιας περιστροφής της Γης. Το σημείο της ουράνιας σφαίρας που αντιστοιχεί στο διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας (θετικό σε δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς) λέγεται *Βόρειος Πόλος (North Pole)* του ουρανού, ενώ το αντιδιαμετρικό του λέγεται *Νότιος Πόλος (South Pole)*. Αν φανταστούμε την μοναδιαία ακτίνα της ουράνιας σφαίρας ίση με την ακτίνα της Γης, ο Βόρειος Πόλος του ουρανού θα αντιστοιχεί στον γεωγραφικό Βόρειο Πόλο.

Ο μέγιστος κύκλος της ουράνιας σφαίρας που έχει τους Πόλους του ουρανού ως γεωμετρικούς πόλους λέγεται *ουράνιος Ισημερινός* (*celestial Equator*) και είναι ο βασικός μέγιστος κύκλος του ουρανογραφικού συστήματος. Όλοι οι μέγιστοι κύκλοι που περνούν από τους ουράνιους Πόλους (είναι επομένως κάθετοι στον ουράνιο Ισημερινό) λέγονται *ωριαίοι κύκλοι* (*hour circles*) και ένας από αυτούς επιλέγεται ως αφετηρία των μετρήσεων. Η επιλογή αυτή βασίζεται στην δεύτερη σημαντική κίνηση της Γης, που είναι η ετήσια περιφορά της γύρω από τον Ήλιο.

Σύμφωνα με την Μηχανική, η κίνηση γύρω από ένα ελκτικό κέντρο ακολουθεί μια κωνική τομή που, στην περίπτωση των πλανητών όπως η Γη, είναι έλλειψη. Το επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς της Γης ορίζει στην ουράνια σφαίρα ένα μέγιστο κύκλο που λέγεται *Εκλειπτική* (*ecliptic*). Ο κύκλος αυτός έχει μια κλίση περίπου 23.5° ως προς τον ουράνιο Ισημερινό (λόξωση της Εκλειπτικής – *obliquity of the ecliptic*) και, συνεπώς, τέμνει τον Ισημερινό σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία, το *Εαρινό* (Υ) και το *Φθινοπωρινό* (Ψ) *Ισημερινό σημείο* (*vernal & autumnal equinox*). Από τα σημεία αυτά περνά ο Ήλιος κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία, αντίστοιχα, ακολουθώντας την φαινόμενη ετήσια πορεία του πάνω στην Εκλειπτική.



Σχήμα 1.2

Αφετηρία των μετρήσεων στο ουρανογραφικό σύστημα ορίζεται ο ωριαίος κύκλος που περνά από το Εαρινό Ισημερινό σημείο Υ (ή πρώτο σημείο του Κριού - *vernal equinox* ή *first point of Aries*). Η πρώτη συντεταγμένη του συστήματος ονομάζεται *ορθή αναφορά* α (*right ascension*) και ορίζεται ως η διεδρη γωνία μεταξύ της αφετηρίας (ωριαίος του Υ) και του ωριαίου του άστρου (γενικότερα, της διεύθυνσης που μας ενδιαφέρει). Η γωνία αυτή μετράται κατά την ορθή φορά (δηλαδή αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού, όπως παρατηρεί κανείς την ουράνια σφαίρα πάνω από τον Βόρειο Πόλο του ουρανού) και σε συμβατικές μονάδες γωνίας που λέγονται *ώρες*,

από 0^h ως 24^h. Προφανώς, η ορθή αναφορά μπορεί να μετρηθεί και ως τόξο του Ισημερινού μεταξύ των δύο ωριαίων (αντίστοιχη επίπεδη γωνία της διέδρου).

Η δεύτερη συντεταγμένη ονομάζεται *απόκλιση* δ (*declination*) και μετράται πάνω στον ωριαίο του άστρου, από τον Ισημερινό μέχρι το άστρο (είναι δηλαδή το μήκος ενός τόξου του ωριαίου). Η απόκλιση μετράται σε *μοίρες*, από 0° ως +90° προς τον Βόρειο Πόλο (*Βόρειο ημισφαίριο* του ουρανού) και από 0° ως -90° προς τον Νότιο Πόλο (*Νότιο ημισφαίριο*).

Εξειδικεύοντας τις συνθήκες και την χρονική στιγμή ορισμού των βασικών στοιχείων (άξονας περιστροφής, εκλειπτική, ισημερινό σημείο, κέντρο συστήματος) προκύπτει το ουρανογραφικό σύστημα που χρησιμοποιείται σήμερα και είναι γνωστό ως **Διεθνές Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς (International Celestial Reference System)**. Το σύστημα αυτό υλοποιείται με το **Διεθνές Ουράνιο Πλαίσιο Αναφοράς (ICR Frame)**, το οποίο βασίζεται στην θέση της εκλειπτικής και του μέσου Ισημερινού την εποχή J2000 (βλέπε κεφάλαια περί χρόνου και μεταβολών των συντεταγμένων) και ορίζεται από τις ακριβείς συντεταγμένες (α,δ) εξωγαλαξιακών ραδιοπηγών (quasars) που, λόγω της τεράστιας απόστασής τους, θεωρούνται ακίνητες και είναι η καλύτερη προσέγγιση προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

1.4 Το Εκλειπτικό σύστημα

Παραλλαγή του ουρανογραφικού συστήματος αποτελεί το **εκλειπτικό** σύστημα αναφοράς. Σε αυτό, βασικός κύκλος είναι ο οριζόμενος από την εκλειπτική και αφετηρία των μετρήσεων πάλι το εαρινό ισημερινό σημείο Υ . Η πρώτη συντεταγμένη ονομάζεται *εκλειπτικό μήκος* λ και μετράται κατά την ορθή φορά σε μοίρες, από 0° ως 360°. Η δεύτερη ονομάζεται *εκλειπτικό πλάτος* β και μετράται σε μοίρες, από 0° ως 90° πάνω από το επίπεδο της εκλειπτικής (στο ημισφαίριο που περιέχει και τον Βόρειο Πόλο του ουρανού) και από 0° ως -90° κάτω από το επίπεδο της εκλειπτικής.

Το εκλειπτικό σύστημα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την περιγραφή των κινήσεων των σωμάτων του ηλιακού μας συστήματος, καθώς και για την περιγραφή των φαινομένων της μετάπτωσης και της κλόνησης (βλέπε κεφάλαιο περί μεταβολών των συντεταγμένων).

1.5 Το Αστρονομικό σύστημα

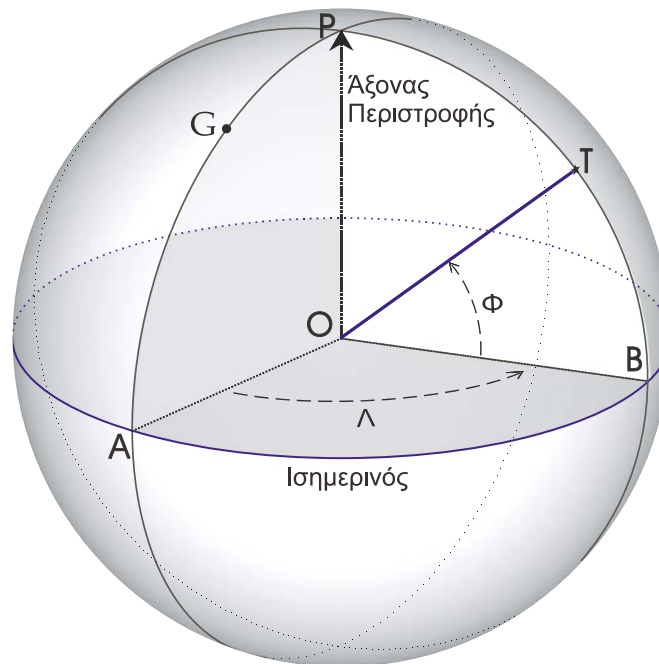
Το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της θέσης των παρατηρητών (ή γενικότερα σημείων της Γης) είναι το **αστρονομικό (astronomical reference system)**. Η βασική διεύθυνση που το ορίζει είναι και πάλι η διεύθυνση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της Γης, δηλαδή ο άξονας του κόσμου. Επομένως, ο βασικός μέγιστος κύκλος και αυτού του συστήματος είναι ο ουράνιος Ισημερινός. Οι μέγιστοι κύκλοι που περνούν από τους ουράνιους Πόλους λέγονται τώρα *μεσημβρινοί (meridians)* και ως αφετηρία των μετρήσεων επιλέγεται εκείνος που περιέχει το ζενίθ του Γκρήνουιτς (Greenwich) και ονομάζεται *πρωτεύων μεσημβρινός (prime meridian)*.

Για να κατανοηθεί καλύτερα ο ορισμός, αλλά και η χρήση, του αστρονομικού συστήματος, υπενθυμίζεται ότι, στην Αστρονομία, ο όρος 'θέση' ενός σημείου **δεν** υπονοεί την *πραγματική του θέση* στην επιφάνεια της Γης (όπως συμβαίνει με τη γεωδαιτική χρήση του όρου) αλλά την *διεύθυνση* ενός διανύσματος, αντιπροσωπευτικού του σημείου αυτού. Σαν τέτοιο χαρακτηριστικό διάνυσμα χρησιμοποιείται η *διεύθυνση της κατακορύφου* (*direction of the vertical*), που ορίζεται ως το μοναδιαίο διάνυσμα που είναι αντίθετο με το διάνυσμα της *έντασης* (*επιτάχυνσης*) του *Γήινου πεδίου βαρύτητας* στο σημείο αυτό. Το σημείο της ουράνιας σφαίρας που αντιστοιχεί στο διάνυσμα της κατακορύφου ενός τόπου λέγεται *ζενίθ* (*zenith*) του τόπου και το αντιδιαμετρικό του σημείο λέγεται *ναδίρ* (*nadir*). Από τον ορισμό αυτό προκύπτει πως, σε κάθε τόπο, το ζενίθ βρίσκεται 'πάνω από το κεφάλι' του παρατηρητή.

Υπενθυμίζεται εδώ ότι η *διεύθυνση της κατακορύφου* σ' ένα τόπο διαφέρει από την *διεύθυνση της καθέτου στο ελλειψοειδές αναφοράς* στον τόπο αυτό. Η (μικρή) γωνία που σχηματίζουν οι δύο διευθύνσεις λέγεται *απόκλιση της κατακορύφου* (*deflection of the vertical*) και ο προσδιορισμός της αποτελεί σκοπό της Γεωδαιτικής Αστρονομίας.

Οι συντεταγμένες στο αστρονομικό σύστημα ορίζονται όπως και στο ουρανογραφικό. Η πρώτη συντεταγμένη του συστήματος ονομάζεται *αστρονομικό μήκος* Λ (*astronomical longitude*) και ορίζεται ως η διεδρη γωνία μεταξύ της αφετηρίας (πρωτεύων μεσημβρινός) και του μεσημβρινού του τόπου. Η γωνία αυτή μετράται κατά την ορθή φορά σε *μοίρες*, από 0° ως 360° . Προφανώς, το μήκος μπορεί να μετρηθεί και ως τόξο του Ισημερινού μεταξύ των δύο μεσημβρινών (αντίστοιχη επίπεδη γωνία της διέδρου).

Η δεύτερη συντεταγμένη ονομάζεται *αστρονομικό πλάτος* Φ (*astronomical latitude*) και μετράται πάνω στον μεσημβρινό του τόπου, από τον Ισημερινό μέχρι το ζενίθ (είναι δηλαδή το μήκος ενός τόξου του μεσημβρινού). Το πλάτος μετράται επίσης σε *μοίρες*, από 0° ως $+90^\circ$ προς τον Βόρειο Πόλο και από 0° ως -90° προς τον Νότιο Πόλο.



Σχήμα 1.3

Είναι προφανές ότι το αστρονομικό σύστημα ‘μοιράζεται’ τα ίδια ακριβώς γεωμετρικά χαρακτηριστικά με το ουρανογραφικό. Και τα δύο στηρίζονται στην ίδια βασική διεύθυνση (διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας της Γης) και διαφέρουν μόνο κατά τον ορισμό της αφειρησίας των μετρήσεων. Επειδή ο μεσημβρινός του Γκρήνουιτς είναι σταθερός ‘ως προς την Γη’ και ο ωριαίος του Υ’ σταθερός ‘ως προς τα άστρα’ (βλέπε και κεφάλαιο μεταβολών των συντεταγμένων), τα δυο συστήματα συνδέονται με μία μεταβαλλόμενη γωνία στροφής (γύρω από τον άξονα του κόσμου) λόγω της ημερήσιας περιστροφής της Γης. Το γεγονός αυτό ακριβώς κάνει αναγκαία την μέτρηση του χρόνου σ’ όλες τις διαδικασίες προσδιορισμών στην Γεωδαιτική Αστρονομία.

1.6 Γήινα συστήματα αναφοράς

Ένα ιδεατό γήινο σύστημα (ideal terrestrial system) αναφοράς ορίζεται σαν ένα σύστημα αναφοράς προσκολλημένο στη Γη, που συμπεριτρέφεται μαζί της. Ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να αναπαριστά κάποιο ιδεατό γήινο σώμα στο οποίο οι συντεταγμένες των στάσεων είτε είναι σταθερές είτε αλλάζουν με ένα γνωστό τρόπο. Ορίζεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες της Γης έτσι ώστε ένα σημείο να έχει σταθερές συντεταγμένες στο σύστημα αυτό. Επειδή ένα τέτοιο σύστημα περιτρέφεται μαζί με τη Γη, είναι μη-αδρανειακό σύστημα.

Το γήινο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το **Διεθνές Γήινο Σύστημα Αναφοράς (International Terrestrial Reference System)**, που ορίζεται ως εξής:

1. ως κέντρο του συστήματος λαμβάνεται το κέντρο μάζας της Γης.
2. άξονας Z λαμβάνεται η διεύθυνση προς τον μέσο πόλο της περιόδου 1900-1905 (CIO – Conventional International Origin).
3. ο άξονας X περνάει από τον μεσημβρινό του Greenwich και ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

Ένα συμβατικό γήινο πλαίσιο αναφοράς είναι η υλοποίηση του ιδεατού συστήματος, που ορίζεται από ένα σύνολο σημείων (σταθμών) με καθορισμένες συντεταγμένες. Ως τέτοιο πλαίσιο σήμερα χρησιμοποιείται το **Διεθνές Γήινο Πλαίσιο Αναφοράς (International Terrestrial Reference Frame)**. Το ITRF βασίζεται σε μετρήσεις συγκεκριμένης εποχής και ορίζεται από τις ορθογώνιες συντεταγμένες (x,y,z) και τις ταχύτητες ενός δικτύου επίγειων σταθμών, οι οποίες έχουν προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια και παρακολουθούνται συνεχώς με μεθόδους δορυφορικής (π.χ. GPS, SLR, LLR, DORIS) και διαστημικής (π.χ. VLBI) γεωδαισίας.

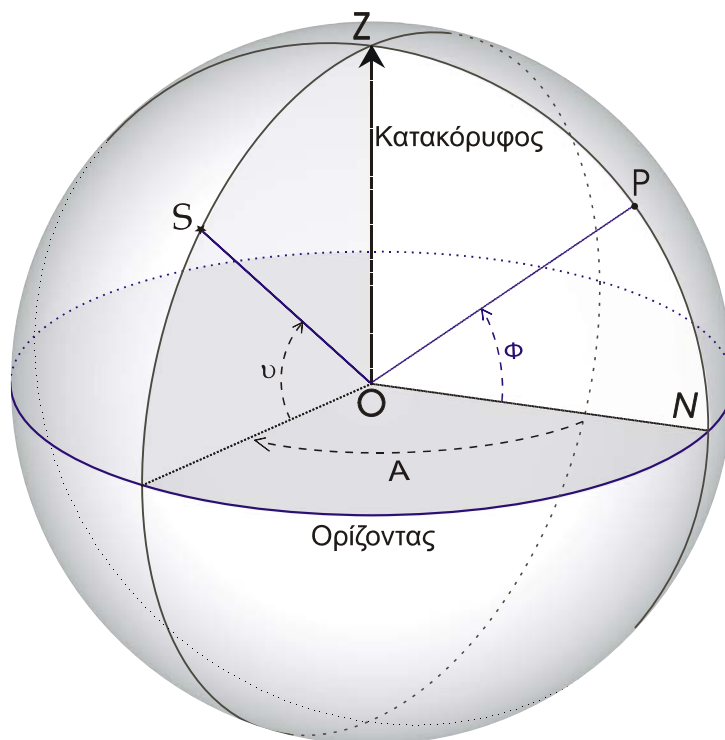
Σε κάθε χρονική στιγμή, το ITRS συνδέεται με το ICRS μέσω των **Παραμέτρων Προσανατολισμού της Γης (Earth Orientation Parameters)** που θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια.

1.7 Το Οριζόντιο σύστημα

Το τελευταίο βασικό σύστημα αναφοράς είναι το **τοπικό ή οριζόντιο** σύστημα (**horizon system**) που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διεύθυνσης παρατήρησης προς ένα ουράνιο σώμα, όπως αυτό φαίνεται από ένα τόπο κάποια χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια, είναι το σύστημα που περιγράφει τις μετρήσεις σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο.

Η βασική διεύθυνση που ορίζει το σύστημα είναι η *διεύθυνση της κατακόρυφου* του τόπου, η οποία περιγράφηκε προηγουμένως. Ο βασικός μέγιστος κύκλος του συστήματος, που έχει ως γεωμετρικούς του πόλους το ζενίθ και το ναδίρ του τόπου, λέγεται *αστρονομικός ορίζοντας* (*astronomical horizon*) του τόπου. Οι μέγιστοι κύκλοι που περνούν από το ζενίθ και το ναδίρ (είναι συνεπώς κάθετοι στον ορίζοντα) ονομάζονται *κατακόρυφοι κύκλοι* (*vertical circles*). Ένας από αυτούς πρέπει να αποτελέσει την αφετηρία των μετρήσεων. Για τον σκοπό αυτό επιλέγεται ο κατακόρυφος κύκλος που περιέχει το Βόρειο Πόλο του ουρανού, ο οποίος ονομάζεται *αστρονομικός μεσημβρινός* (*astronomical meridian*) του τόπου.

Η πρώτη συντεταγμένη του οριζόντιου συστήματος ονομάζεται *αστρονομικό αζιμούθιο* **A** (*astronomical azimuth*) και ορίζεται ως η διεδρη γωνία μεταξύ της αφετηρίας (αστρονομικός μεσημβρινός) και του κατακόρυφου κύκλου της διεύθυνσης παρατήρησης. Η γωνία αυτή μετράται κατά την ανάδρομη φορά σε *μοίρες*, από 0° ως 360° (όπως γίνεται δηλαδή η μέτρηση των οριζοντίων γωνιών στην Τοπογραφία). Προφανώς, το αζιμούθιο μπορεί να μετρηθεί και ως τόξο του ορίζοντα μεταξύ των δύο κατακόρυφων κύκλων (αντίστοιχη επίπεδη γωνία της διέδρου).



Σχήμα 1.4

Η δεύτερη συντεταγμένη ονομάζεται *ύψος* u (*altitude*) και μετράται πάνω στον κατακόρυφο κύκλο, από τον ορίζοντα μέχρι τη διεύθυνση παρατήρησης (είναι δηλαδή το μήκος ενός τόξου του κατακόρυφου κύκλου). Το ύψος μετράται σε *μοίρες*, από 0° ως $+90^\circ$ προς το ζενίθ (πάνω από τον ορίζοντα) και από 0° ως -90° προς το ναδίρ (κάτω από τον ορίζοντα). Πολλές φορές ως δεύτερη συντεταγμένη χρησιμοποιείται, αντί του ύψους, η *ζενίθια απόσταση* ή *ζενίθια γωνία* z (*zenith distance* or *zenith angle*), που είναι το τόξο του κατακόρυφου κύκλου από το ζενίθ μέχρι την διεύθυνση παρατήρησης. Η ζενίθια απόσταση μετράται επίσης σε *μοίρες*, από 0° στο ζενίθ μέχρι 180° στο ναδίρ. Προφανώς, η ζενίθια απόσταση είναι συμπληρωματική γωνία του ύψους, ισχύει δηλαδή πάντα : $z = 90^\circ - u$.

Από τον ορισμό του οριζόντιου συστήματος προκύπτει ότι οι οριζόντιες συντεταγμένες μιας διεύθυνσης παρατήρησης μπορούν να μετρηθούν όταν υλοποιηθεί το αντίστοιχο πλαίσιο αναφοράς με τη βοήθεια ενός θεοδόλιχου. Η υλοποίηση γίνεται με δύο συνθήκες:

- 1) Το θεοδόλιχο είναι οριζοντιωμένο, δηλαδή ο πρωτεύων άξονας περιστροφής του οργάνου είναι παράλληλος με την διεύθυνση της κατακόρυφου (με άλλα λόγια, ο οριζόντιος δίσκος του βρίσκεται στο επίπεδο του αστρονομικού ορίζοντα).
- 2) Το θεοδόλιχο είναι προσανατολισμένο, δηλαδή η αφετηρία των οριζοντίων αναγνώσεων βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο του αστρονομικού μεσημβρινού του τόπου.

Η οριζοντίωση είναι απαραίτητη προϋπόθεση και εκτελείται πάντα πριν από την διεξαγωγή των μετρήσεων αλλά ο προσανατολισμός μπορεί να επιτευχθεί μόνο μετά από ειδική διαδικασία μετρήσεων και υπολογισμών, όπως θα δούμε αργότερα.

Μετά τον ορισμό των βασικών στοιχείων του οριζόντιου συστήματος, μερικά ακόμη στοιχεία είναι πολύ χρήσιμα:

- Ο κατακόρυφος κύκλος που είναι κάθετος στον αστρονομικό μεσημβρινό λέγεται *πρωτεύων κατακόρυφος κύκλος* (*prime vertical*).
- Τα σημεία τομής του ορίζοντα με τον αστρον. μεσημβρινό και τον πρωτεύοντα κατακόρυφο κύκλο ονομάζονται: *Βορράς* (*North*) με $A = 0^\circ$ και *Νότος* (*South*) με $A = 180^\circ$, *Ανατολή* (*East*) με $A = 90^\circ$ και *Δύση* (*West*) με $A = 270^\circ$, αντίστοιχα.

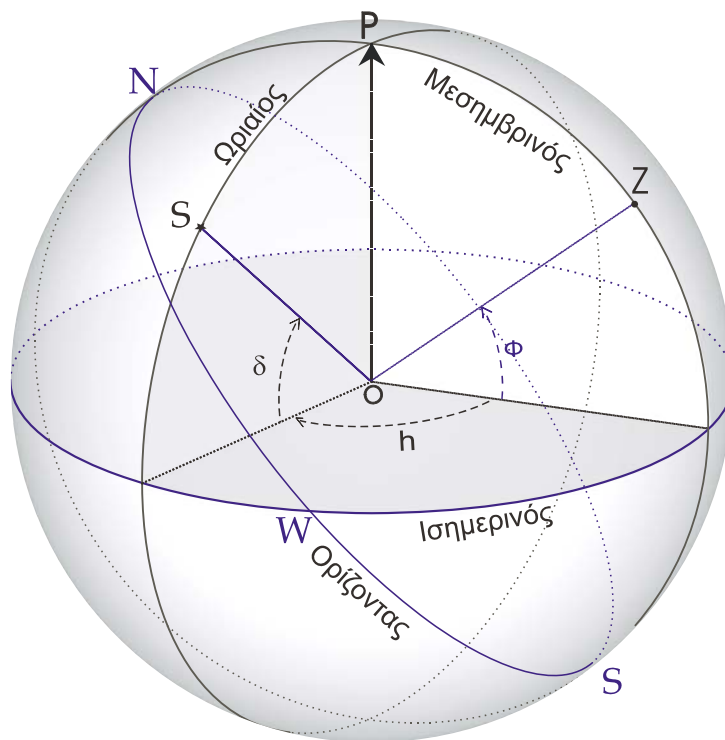
1.8 Το Ισημερινό σύστημα

Όπως είδαμε, το οριζόντιο σύστημα διαφέρει από τα άλλα δύο και ως προς την κλίση του και γιατί οι οριζόντιες συντεταγμένες ενός στόχου μεταβάλλονται με τον χρόνο. Για να διευκολυνθεί η σύνδεση των συστημάτων, δηλαδή η εύρεση των μαθηματικών σχέσεων που συνδέουν τις διάφορες συντεταγμένες, είναι πολύ πρακτικό να χρησιμοποιηθεί ένα ακόμα σύστημα συντεταγμένων, που δανείζεται στοιχεία από το ουρανογραφικό και το οριζόντιο σύστημα. Αυτό είναι το λεγόμενο **Ισημερινό σύστημα** ή **σύστημα ωριαίας γωνίας** (**hour angle system**). Η βασική διεύθυνση του συστήματος είναι πάλι ο άξονας του κόσμου, επομένως το σύστημα έχει την ίδια γεωμετρία με το ουρανογραφικό. Η αφετηρία των μετρήσεων, όμως,

είναι ο *ωριαίος κύκλος που περνά από το ζενίθ*, δηλαδή ο *αστρονομικός μεσημβρινός* του τόπου. Συνεπώς, το σύστημα αυτό είναι τοπικό.

Η πρώτη συντεταγμένη του ισημερινού συστήματος ονομάζεται *ωριαία γωνία h* (*hour angle*) και ορίζεται ως η διεδρη γωνία μεταξύ της αφετηρίας (αστρονομικός μεσημβρινός) και του ωριαίου κύκλου της διεύθυνσης παρατήρησης. Η γωνία αυτή μετράται κατά την ανάδρομη φορά σε *ώρες*, από 0^h ως 24^h . Προφανώς, η ωριαία γωνία μπορεί να μετρηθεί και ως τόξο του ισημερινού μεταξύ των δύο ωριαίων κύκλων (αντίστοιχη επίπεδη γωνία της διέδρου).

Η δεύτερη συντεταγμένη είναι η *απόκλιση δ* , όπως ακριβώς και στο ουρανογραφικό σύστημα. Όπως είδαμε, αυτή είναι ανεξάρτητη τόπου και χρόνου, ενώ η ωριαία γωνία εξαρτάται από τον τόπο και μεταβάλλεται με τον χρόνο. Μάλιστα, αυτή ακριβώς η μεταβολή της μας δίνει την δυνατότητα να ορίσουμε κλίμακες μέτρησης του χρόνου, όπως θα δούμε αργότερα.



Σχήμα 1.5

Ασκήσεις κατανόησης

- 1) Μονάδες μέτρησης γωνιών: ένας πλήρης κύκλος ισοδυναμεί με 2π ακτίνια ή, σε συμβατικές μονάδες, 360° ή 400^g ή 24^h . Εξοικειωθείτε με τις μετατροπές μεταξύ των διαφόρων μονάδων και των υποδιαιρέσεών τους (δεκαδικές για ακτίνια και βαθμούς, εξηκονταδικές για μοίρες και ώρες)
- 2) Σε κάποιο τόπο του Βόρειου ημισφαιρίου, που έχει αστρονομικό πλάτος Φ , προσδιορίστε τις οριζόντιες και τις ισημερινές συντεταγμένες: του ζενίθ, του ναδίρ, του Βόρειου Πόλου του ουρανού και των σημείων του ορίζοντα.

- 3) Εξετάστε την γεωμετρική σχέση των εξής μέγιστων κύκλων: ορίζοντας, ισημερινός, πρώτος κατακόρυφος κύκλος. Εξετάστε ακόμα πως εξαρτάται η σχέση αυτή από το αστρονομικό πλάτος του τόπου.

Ανακεφαλαίωση

- Η Γεωδαιτική Αστρονομία χρησιμοποιεί διευθύνσεις (ελεύθερα, μοναδιαία διανύσματα).
- Όλες οι διευθύνσεις αντιστοιχούν στα σημεία της επιφάνειας μιας μοναδιαίας σφαίρας, που ονομάζεται ουράνια σφαίρα.
- Για την περιγραφή της θέσης ενός σημείου στην ουράνια σφαίρα χρειάζονται δύο μόνο γωνίες (σφαιρικές συντεταγμένες) σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Για να οριστεί ένα τέτοιο σύστημα χρειάζεται μια βασική διεύθυνση ευθείας (ή επιπέδου) και μία αυθαίρετη αρχή των μετρήσεων. Το πεδίο βαρύτητας και οι διάφορες κινήσεις της Γης ορίζουν όλα τα συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιεί η Γεωδαιτική Αστρονομία.
- Το ουρανογραφικό σύστημα περιγράφει την θέση των στόχων παρατήρησης (άστρων) και είναι σταθερό ως προς αυτά, δηλαδή οι ουρανογραφικές συντεταγμένες (α , δ) ενός άστρου είναι (σχεδόν) ανεξάρτητες από τον τόπο και τον χρόνο¹.
- Το αστρονομικό σύστημα περιγράφει την 'θέση' των διαφόρων τόπων της Γης, σε σχέση με το πεδίο βαρύτητας, και είναι σταθερό ως προς αυτή. Οι αστρονομικές συντεταγμένες (Λ , Φ) ενός τόπου παραμένουν (σχεδόν) σταθερές².
- Τα δύο συστήματα (ουρανογραφικό – αστρονομικό) στηρίζονται στην ίδια βασική διεύθυνση (διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας της Γης) και διαφέρουν μόνο κατά μία μεταβαλλόμενη γωνία στροφής (γύρω από τον άξονα του κόσμου) λόγω της ημερήσιας περιστροφής της Γης.
- Το οριζόντιο σύστημα περιγράφει τις μετρήσεις. Οι οριζόντιες συντεταγμένες (A , u) ενός άστρου μεταβάλλονται με τον τόπο και τον χρόνο. Για κάθε τόπο, το οριζόντιο σύστημα έχει σταθερή σχέση (κλίση) ως προς το αστρονομικό σύστημα, η οποία εξαρτάται από το αστρονομικό πλάτος Φ του τόπου.
- Το ισημερινό σύστημα, με συντεταγμένες (h , δ), είναι ένα 'μίγμα' του οριζόντιου και του ουρανογραφικού συστήματος, χρήσιμο για την σύνδεση των άλλων συστημάτων. Η ωριαία γωνία μεταβάλλεται με τον χρόνο και αποτελεί την βάση για τον ορισμό των αστρονομικών κλιμάκων μέτρησης του χρόνου.

¹ Στην πραγματικότητα, η τρίτη σημαντική κίνηση της Γης, η μετάπτωση (precession), προκαλεί αργές μεταβολές στις ουρανογραφικές συντεταγμένες.

² Σε σχέση με την πραγματική θέση του τόπου στην φυσική γήινη επιφάνεια, υπάρχουν μικρές μεταβολές που οφείλονται στην κίνηση του Πόλου (polar motion).

Συγκριτικός πίνακας συστημάτων αναφοράς

Στοιχείο	Ουρανογραφικό	Αστρονομικό	Οριζόντιο	Ισημερινό
Χαρακτηρισμός	Παγκόσμιο	Παγκόσμιο	Τοπικό	Τοπικό
Βασική διεύθυνση	Άξονας περιστροφής Γης	Άξονας περιστροφής Γης	Κατακόρυφος του τόπου	Άξονας περιστροφής Γης
Βασικός μέγιστος κύκλος	Ουράνιος Ισημερινός	Ουράνιος Ισημερινός	Αστρονομικός Ορίζοντας	Ουράνιος Ισημερινός
Παραμετρικοί μέγιστοι κύκλοι	Ωριαίοι κύκλοι	Μεσημβρινοί	Κατακόρυφοι κύκλοι	Ωριαίοι κύκλοι
Αφετηρία	Ωριαίος του Υ (εαρινό ισημερινό σημείο)	Μεσημβρινός του Greenwich	Κατακόρυφος του Βόρειου Πόλου του ουρανού = Αστρονομικός Μεσημβρινός του τόπου	Ωριαίος κύκλος του Zenith = Αστρονομικός Μεσημβρινός του τόπου
1 ^η συντεταγμένη	Ορθή αναφορά α (1)	Αστρον. Μήκος Λ (1)	Αζιμούθιο A (2)	Ωριαία γωνία h (2)
2 ^η συντεταγμένη	Απόκλιση δ	Αστρον. Πλάτος Φ	Ύψος ν (3)	Απόκλιση δ
Συσχέτιση	Ουρανογραφικό \Leftrightarrow Αστρονομικό Γωνία στροφής \propto χρόνου		Αστρονομικό \Leftrightarrow Οριζόντιο Σταθερή κλίση = $90^\circ - \Phi$	Υβρίδιο Ουρανογραφικού - Οριζόντιου

Σημειώσεις:

- (1) Μέτρηση κατά την ορθή φορά (αριστερόστροφα)
- (2) Μέτρηση κατά την ανάδρομη φορά (δεξιόστροφα)
- (3) Χρησιμοποιείται και η ζενίθια απόσταση $z = 90^\circ - \nu$