

6. ΑΝΑΓΩΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

6.1 Εισαγωγή

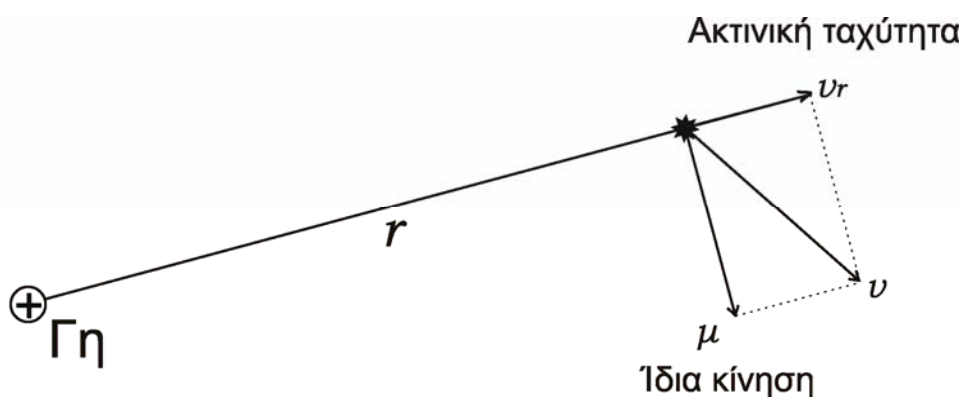
Ως τώρα έχουμε δεχθεί ότι οι ουρανογραφικές συντεταγμένες (α, δ) κάθε άστρου ή οι αστρονομικές συντεταγμένες (Λ, Φ) ενός συγκεκριμένου τόπου παραμένουν σταθερές, αναλλοίωτες με τον χρόνο. Στην πραγματικότητα, όμως, μια σειρά από κινήσεις και φαινόμενα, που είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη, προκαλούν μεταβολές στις τιμές των συντεταγμένων.

Οι μεταβολές αυτές μπορούν να οφείλονται σε τρεις διαφορετικές αιτίες:

- 1) Πραγματική αλλαγή θέσης (δηλαδή κίνηση) του αντικειμένου που παρατηρείται.
- 2) Μετατόπιση του συστήματος αναφοράς.
- 3) Φαινόμενα που οφείλονται στην σχετική κίνηση του παρατηρητή ως προς το αντικείμενο που παρατηρείται.

6.2 Ίδια κίνηση των άστρων

Τα άστρα φαίνονται να κινούνται *πολύ αργά* σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις στον ουρανό. Η μετατόπιση αυτή είναι συνέπεια της πραγματικής κίνησης κάθε άστρου στον χώρο (συμπεριλαμβανομένου και του Ήλιου). Η ταχύτητα της κίνησης ενός άστρου σχετικά με τον Ήλιο μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες (σχήμα 6.1): μία κατά μήκος της ευθείας άστρου – Ήλιου (πρακτικά κατά μήκος της οπτικής ακτίνας του άστρου προς ένα γήινο παρατηρητή) και μια σε ένα επίπεδο κάθετο στην προηγούμενη διεύθυνση, δηλαδή σ' ένα επίπεδο *εφαπτόμενο στην ουράνια σφαίρα*.



Σχήμα 6.1

Η πρώτη συνιστώσα λέγεται **ακτινική ταχύτητα (radial velocity v_r)**, μετράται συνήθως σε km/sec και μπορεί να προσδιοριστεί με την βοήθεια του φαινομένου Doppler.

Υπενθυμίζεται ότι το φαινόμενο Doppler συνίσταται στην μεταβολή του μήκους κύματος λ που παρατηρείται όταν υπάρχει σχετική κίνηση της πηγής και του

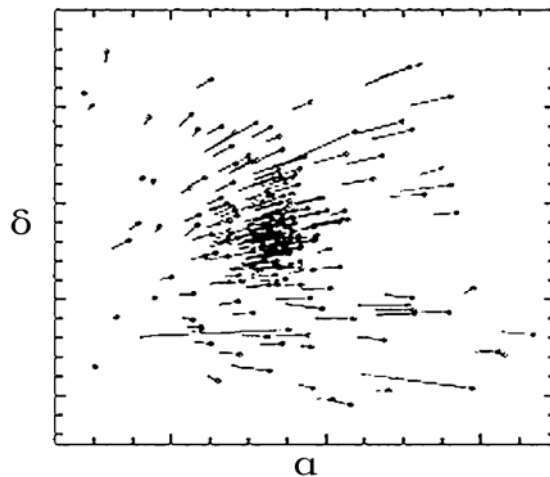
παρατηρητή. Στην περίπτωση των άστρων η μεταβολή αυτή ανιχνεύεται από την μετατόπιση των γραμμών στο φάσμα του άστρου, σε σχέση με την θέση των ίδιων γραμμών από μια ακίνητη πηγή. Η μετατόπιση γίνεται προς το ερυθρό (μεγαλύτερα μήκη κύματος) όταν το άστρο απομακρύνεται ενώ γίνεται προς το ιώδες (μικρότερα μήκη κύματος) όταν το άστρο πλησιάζει. Η μετατόπιση είναι ανάλογη της ταχύτητας και για μικρές ταχύτητες ($v_r \ll c$), δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} \Rightarrow v_r = c \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Η εφαπτομενική (προς την ουράνια σφαίρα) ταχύτητα λέγεται **ίδια κίνηση (proper motion μ)** και μπορεί να προσδιοριστεί από την φαινόμενη μετατόπιση του άστρου σε κάποιο (μεγάλο) χρονικό διάστημα. Η ίδια κίνηση αναλύεται σε δύο συνιστώσες: μια κατά μήκος του ωριαίου κύκλου (ίδια κίνηση κατά απόκλιση μ_δ) και μια κατά μήκος του μικρού κύκλου απόκλισης (ίδια κίνηση κατά ορθή αναφορά μ_α). Επομένως, η συνολική ίδια κίνηση δίνεται από τον τύπο:

$$\mu = \sqrt{(\mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2}$$

Στο σχήμα 6.2 εμφανίζεται μια απεικόνιση της ίδιας κίνησης ενός σμήνους άστρων.



Ίδια κίνηση των άστρων
του σμήνους των Υάδων

Σχήμα 6.2

Η ίδια κίνηση είναι, ουσιαστικά, γωνιακή ταχύτητα και μετράται σε δευτερόλεπτα τόξου ανά έτος. Για να μεταφραστεί σε γραμμική ταχύτητα V_T πρέπει να είναι γνωστή η απόσταση r του άστρου. Συνήθως η απόσταση εκφράζεται σε parsec, που προκύπτουν από την παράλλαξη π (βλέπε παρακάτω). Στην περίπτωση αυτή η εφαπτομενική ταχύτητα του άστρου (σε km/sec) δίνεται από την σχέση:

$$V_T = \mu r = 4.74 \frac{\mu (\text{arc sec/ year})}{\pi (\text{arc sec})}$$

6.3 Μετατόπιση των συστημάτων αναφοράς

Οι ουρανογραφικές συντεταγμένες (α, δ) των άστρων αλλάζουν εξαιτίας της κίνησης (στροφής) του συστήματος αναφοράς από τα φαινόμενα μετάπτωσης και κλόνησης.

6.3.1 – Μετάπτωση

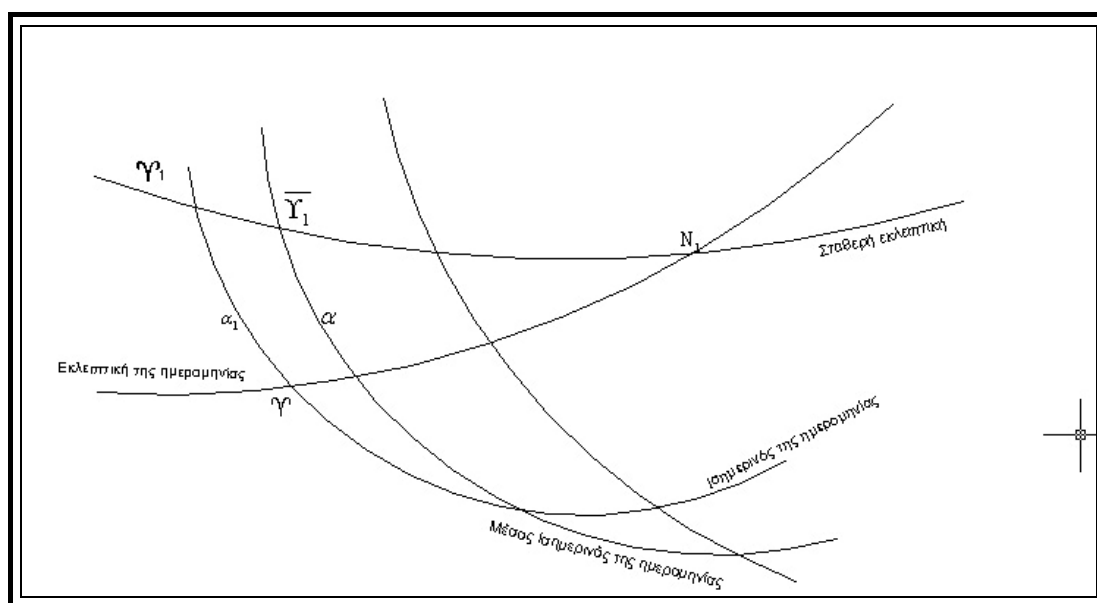
Η μετάπτωση προκαλεί μεταβολή της θέσης του Ισημερινού. Για να μελετηθεί αυτή η κίνηση απαιτείται ο ορισμός ενός σταθερού επιπέδου, ως προς το οποίο θα περιγραφεί η κίνηση του Ισημερινού. Το ρόλο του επιπέδου αυτού παίζει ένας αρχικός Ισημερινός που θα ονομάζεται σταθερός. Ομοίως, για την περιγραφή της κλόνησης χρειάζεται και το επίπεδο μιας αρχικής, σταθερής εκλειπτικής.

Η κίνηση του Ισημερινού μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά συστήματα: α) οι κινήσεις γίνονται κατά μήκος της *εκλειπτικής* και τα αντίστοιχα μεγέθη χαρακτηρίζονται ως μετάπτωση στο εκλειπτικό μήκος και την λόξωση ή β) οι κινήσεις γίνονται κατά μήκος του *Ισημερινού* και τα μεγέθη χαρακτηρίζονται ως μετάπτωση στην ορθή αναφορά.

Η σεληνοηλιακή μετάπτωση του ουράνιου Ισημερινού δεν έχει καμία επίδραση στη θέση της εκλειπτικής, αλλά μεταθέτει τα ισημερινά σημεία κατά μήκος τόσο της εκλειπτικής όσο και του Ισημερινού. Ομοίως, η κίνηση της εκλειπτικής (*πλανητική μετάπτωση*) δεν έχει άμεση επίδραση στη θέση του Ισημερινού αλλά προκαλεί μια περαιτέρω μετάθεση των ισημερινών σημείων κατά μήκος των δυο κύκλων.

Η λόξωση μεταβάλλεται εξαιτίας των κινήσεων και του Ισημερινού και της εκλειπτικής. Η αιώνια μεταβολή της λόξωσης οφείλεται στην κίνηση της εκλειπτικής. Οι περιοδικοί όροι της μεταβολής της λόξωσης και της θέσης των ισημερινών σημείων στην εκλειπτική και στον Ισημερινό προκαλούνται από την κίνηση του Ισημερινού.

Η πραγματική θέση του Ισημερινού, της εκλειπτικής και του ισημερινού σημείου κάποια τυχαία χρονική στιγμή περιγράφεται με τον όρο «... της ημερομηνίας», π.χ. Ισημερινός της ημερομηνίας (Equator of date). Στο σχήμα 6.3 φαίνονται τα βασικά μεγέθη της μετάπτωσης, σύμφωνα με την ορολογία αυτή.



Σχήμα 6.3

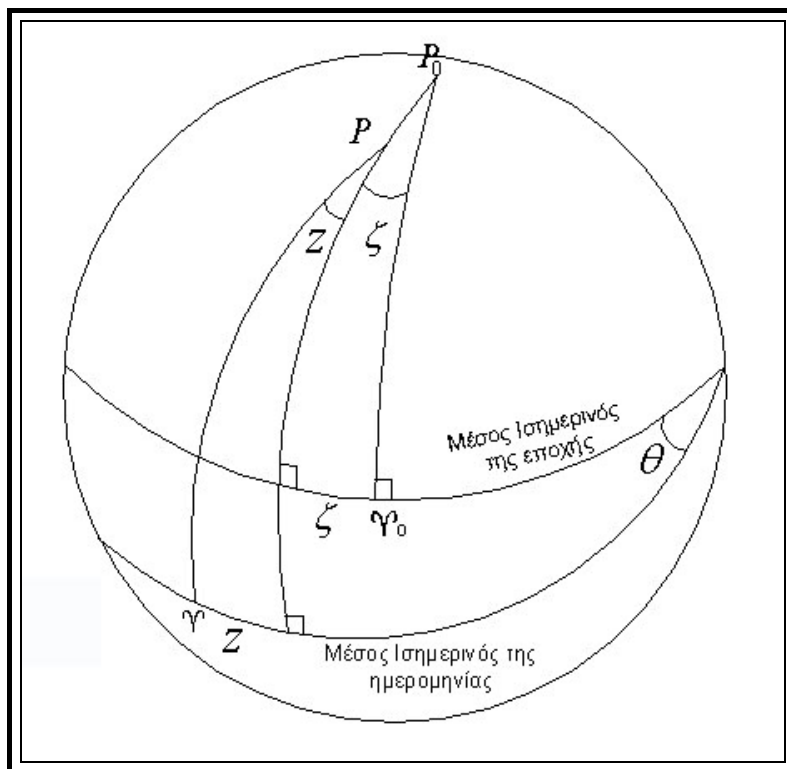
Η θέση του Εαρινού Ισημερινού σημείου Υ της ημερομηνίας στον Ισημερινό της ημερομηνίας προσδιορίζεται από την απόστασή του (τόξο α_1) του Ισημερινού από το σημείο Υ_1 (τομή του Ισημερινού της ημερομηνίας με την σταθερή εκλειπτική). Αντίστοιχα, η θέση του Υ της ημερομηνίας στην εκλειπτική της ημερομηνίας εκφράζεται από το τόξο Λ της εκλειπτικής, μεταξύ του Υ και της τομής N_1 της εκλειπτικής της ημερομηνίας με την σταθερή εκλειπτική.

Η μετάθεση του Εαρινού Ισημερινού σημείου Υ στην εκλειπτική της ημερομηνίας, η οποία αποτελεί ένα μέρος του τόξου Λ , λέγεται *γενική μετάπτωση στο μήκος (general precession in longitude)*. Είναι το αποτέλεσμα της *σεληνοηλιακής μετάπτωσης (lunisolar precession)* προς τα δυτικά (κατά μήκος της σταθερής εκλειπτικής της εποχής) και της ανατολικής μετάθεσης πάνω στον κινούμενο Ισημερινό που προκαλείται από την κίνηση της εκλειπτικής (*πλανητική μετάπτωση*). Η συνολική κίνηση του Εαρινού Ισημερινού σημείου κατά μήκος του Ισημερινού είναι η *γενική μετάπτωση στην ορθή αναφορά (general precession in right ascension)*.

Η επίδραση της μετάπτωσης προσδιορίζεται από το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαφορετικών εποχών, ενώ η επίδραση της κλόνησης υπολογίζεται από την τιμή των σχετικών όρων τη συγκεκριμένη εποχή.

Η μετάπτωση υπολογίζεται ανάμεσα σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές και προσδιορίζει την μετατροπή των συντεταγμένων από μια μέση θέση στην αρχική εποχή στην μέση θέση στην τελική εποχή.

Για τη μετατροπή των μέσων θέσεων από την εποχή T_0 (πόλος P_0 , Εαρινό Ισημερινό σημείο Υ_0) στην εποχή T (πόλος P , Εαρινό Ισημερινό σημείο Υ), είναι απαραίτητο να οριστούν 3 γωνίες. Οι πλέον κατάλληλες γωνίες είναι οι γωνίες ζ , z και θ , οι οποίες φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 6.4:



Σχήμα 6.4

Αρχικά, εφαρμόζεται μια στροφή $-\zeta$ γύρω από τον άξονα z , η οποία κάνει το τόξο $P_0\Upsilon_0$ να περάσει από το σημείο P . Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια στροφή θ , ίση με την γωνιακή απόκλιση των δύο Ισημερινών, γύρω από τον άξονα y και με τον τρόπο αυτό ο μέσος Ισημερινός της εποχής συναντά τον μέσο Ισημερινό της ημερομηνίας (δηλαδή το P_0 συμπίπτει με το P). Τέλος, εφαρμόζεται μια στροφή $-z$ γύρω από τον άξονα z και έτσι προκύπτει το μέσο σημείο Υ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο πίνακας της μετάπτωσης, ο οποίος συμβολίζεται με P , δίνεται από τον συνδυασμό 3 στροφών :

$$P = R_3(-z)R_2(\theta)R_3(-\zeta)$$

ή αναλυτικά:

$$P = \begin{bmatrix} -\sin \zeta \sin z + \cos \zeta \cos z \cos \theta & -\cos \zeta \sin z - \sin \zeta \cos z \cos \theta & -\cos z \sin \theta \\ \sin \zeta \cos z + \cos \zeta \sin z \cos \theta & \cos \zeta \cos z - \sin \zeta \sin z \cos \theta & -\sin z \sin \theta \\ \cos \zeta \sin \theta & -\sin \zeta \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Οι γωνίες ζ , z και θ δίνονται από το μοντέλο μετάπτωσης που χρησιμοποιείται κάθε φορά, μέσω εκφράσεων που περιλαμβάνουν την αρχική εποχή (π.χ. 2000) και την τελική εποχή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, αφού οι γωνίες μετάπτωσης αναφέρονται στην εκλειπτική της εποχής, ο πίνακας στροφής για την μετάπτωση εξαρτάται τόσο από την μετάπτωση του Ισημερινού όσο και από την μετάπτωση της εκλειπτικής. Δηλαδή τα μοντέλα μετάπτωσης περιλαμβάνουν την πλανητική μετάπτωση και έτσι δεν χρειάζεται να γίνει ξεχωριστή αναγωγή.

Το μοντέλο μετάπτωσης που χρησιμοποιείται μέχρι τώρα (μοντέλο IAU 1976) δίνεται από τις εκφράσεις:

$$\zeta = (2306''.2181 + 1''.39656t_0 - 0''.000139t_0^2)t_1 + (0''.30188 - 0''.000344t_0)t_1^2 + 0''.017988t_1^3$$

$$\theta = (2004''.3109 - 0''.85330t_0 - 0''.000217t_0^2)t_1 + (-0''.42665 - 0''.000217t_0)t_1^2 - 0''.041833t_1^3$$

$$z = (2306''.2181 + 1''.39656t_0 - 0''.000139t_0^2)t_1 + (1''.09468 - 0''.000066t_0)t_1^2 + 0''.018203t_1^3$$

όπου $t_0 = (JD1 - 2451545.0)/36525$, $t_1 = (JD2 - JD1)/36525$ και οι στιγμές $JD1$, $JD2$ μετρώνται στην κλίμακα του Γήινου Δυναμικού Χρόνου (TDT) ή, πρακτικά, στην κλίμακα του Γήινου Χρόνου (TT).

Από την 1^η Ιανουαρίου 2006 ισχύει ήδη το νέο μοντέλο μετάπτωσης (IAU 2000A), που δίνει βελτιωμένες τιμές στις γωνίες μετάπτωσης και πρέπει να χρησιμοποιείται όταν απαιτείται ακρίβεια καλύτερη από 0".1. Οι αντίστοιχες εκφράσεις είναι:

$$\zeta = 2''.5976176 + 2306''.0809506 t + 0''.3019015 t^2 + 0''.0179663 t^3 - 0''.0000327 t^4 - 0''.0000002 t^5$$

$$\theta = 2004''.1917476 t - 0''.4269353 t^2 - 0''.0418251 t^3 - 0''.0000601 t^4 - 0''.0000001 t^5$$

$$z = -2''.5976176 + 2306''.0803226 t + 1''.0947790 t^2 + 0''.0182273 t^3 + 0''.0000470 t^4 - 0''.0000003 t^5$$

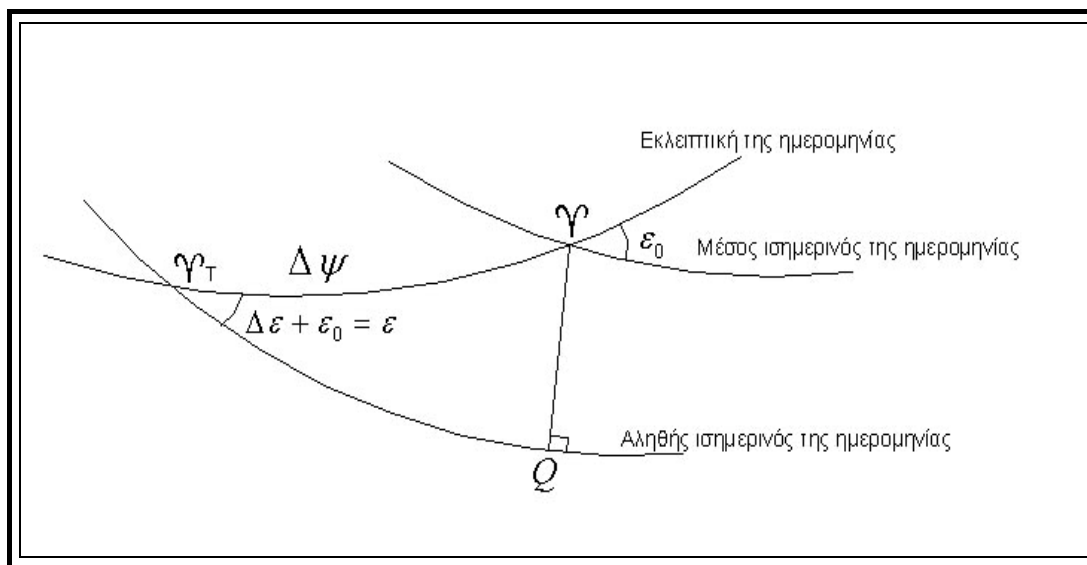
όπου η χρονική στιγμή $t = (JD - 2451545.0)/36525$ μετράται στην κλίμακα του Γήινου Χρόνου TT.

Οι εκφράσεις αυτές ισχύουν για τον υπολογισμό της μετάπτωσης από την αρχική εποχή $J2000$ ($= JD 2451545.0$) προς την τελική εποχή JD .

6.3.2 Κλόνηση

Η επίδραση της κλόνησης υπολογίζεται την ζητούμενη χρονική στιγμή (ημερομηνία) και επιτρέπει την αναγωγή των συντεταγμένων από τη μέση θέση της ημερομηνίας στην αληθή θέση, επίσης της ημερομηνίας.

Για τη μετατροπή των μέσων θέσεων την εποχή T , στις αληθείς θέσεις της ίδιας εποχής είναι απαραίτητο, όπως και στην περίπτωση της μετάπτωσης, να οριστούν τρεις γωνίες. Οι πλέον κατάλληλες γωνίες είναι οι γωνίες ε_0 , ε και $\Delta\psi$, οι οποίες φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 6.5:



Σχήμα 6.5

Αρχικά εφαρμόζεται μια στροφή ε_0 γύρω από τον άξονα x (σημείο Γ), η οποία μετατοπίζει το επίπεδο xy από τον μέσο Ισημερινό της ημερομηνίας στην εκλειπτική της ημερομηνίας. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια στροφή $-\Delta\psi$ (κλόνηση στο μήκος) γύρω από τον άξονα z , και με τον τρόπο αυτό μετατοπίζεται το Εαρινό Ισημερινό σημείο Γ στη θέση Γ_T . Τέλος, εφαρμόζεται μια στροφή $-\varepsilon$ γύρω από τον άξονα x (σημείο Γ_T) που περιστρέφει το επίπεδο xy ώστε να συμπίπτει με εκείνο του αληθούς Ισημερινού της ημερομηνίας.

Η αληθής λόξωση της ημερομηνίας υπολογίζεται από τη σχέση: $\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon$ όπου ε_0 η μέση λόξωση της ημερομηνίας και $\Delta\varepsilon$ η κλόνηση στη λόξωση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο πίνακας της κλόνησης, ο οποίος συμβολίζεται με N , δίνεται από τον συνδυασμό 3 στροφών :

$$N = R_1(-\varepsilon_0 - \Delta\varepsilon)R_3(-\Delta\psi)R_1(\varepsilon_0)$$

Επειδή οι γωνίες $\Delta\psi$ και $\Delta\varepsilon$ είναι πολύ μικρές, ισχύει ότι: $\sin(\Delta\psi) \approx \Delta\psi$ (σε ακτίνια), $\cos(\Delta\psi) \approx 1$ και ομοίως για το $\Delta\varepsilon$. Αναλυτικά, επομένως, ο πίνακας στροφής του μετασχηματισμού για την κλόνηση είναι :

$$N = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\psi \cos \varepsilon & -\Delta\psi \sin \varepsilon \\ \Delta\psi \cos \varepsilon & 1 & -\Delta\varepsilon \\ \Delta\psi \sin \varepsilon & \Delta\varepsilon & 1 \end{bmatrix}$$

Οι γωνίες $\Delta\varepsilon$ και $\Delta\psi$ δίνονται από το μοντέλο κλόνησης που χρησιμοποιείται μέσω αθροισμάτων πολλών όρων, οι οποίοι αποτελούνται από γινόμενα συντελεστών με ημίτονα και συνημίτονα γωνιών. Οι γωνίες αυτές είναι γραμμικοί συνδυασμοί των πέντε βασικών ορισμάτων της κλόνησης (μεταβλητές Delaunay). Οι μεταβλητές αυτές είναι:

1. l = το μέσο μήκος της Σελήνης – το μέσο μήκος του περιγείου της Σελήνης
2. l' = το μέσο μήκος του Ήλιου – το μέσο μήκος του περιγείου του Ήλιου
3. F = το μέσο μήκος της Σελήνης – το μέσο μήκος του δεσμού της Σελήνης
4. D = το μέσο μήκος της Σελήνης – το μέσο μήκος του Ήλιου
5. Ω = το μήκος του μέσου ανιόντος δεσμού της σεληνιακής τροχιάς στην εκλειπτική, μετρημένο από το μέσο Εαρινό σημείο της ημερομηνίας.

Οι συντελεστές των εκφράσεων που υπολογίζουν τα βασικά αυτά ορίσματα έχουν διαφορετικές τιμές, ανάλογα με το μοντέλο κλόνησης που χρησιμοποιείται. Στο μοντέλο κλόνησης του 1980, το οποίο περιλαμβάνει 106 όρους για το $\Delta\psi$ και το $\Delta\varepsilon$, οι εκφράσεις αυτές είναι:

$$l = 134^{\circ}57'46''.733 + (1325^r + 198^{\circ}52'02''.633)T + 31''.310T^2 + 0''.064T^3$$

$$l' = 357^{\circ}31'39''.804 + (99^r + 359^{\circ}03'01''.224)T - 0''.577T^2 - 0''.012T^3$$

$$F = 93^{\circ}16'18''.877 + (1342^r + 82^{\circ}01'03''.137)T - 13''.257T^2 + 0''.011T^3$$

$$D = 297^{\circ}51'01''.307 + (1236^r + 307^{\circ}06'41''.328)T - 6''.891T^2 + 0''.019T^3$$

$$\Omega = 125^{\circ}02'40''.280 - (5^r + 134^{\circ}08'10''.539)T + 7''.455T^2 + 0''.008T^3$$

Η μέση λόξωση της εκλειπτικής ε_0 δίνεται από τη σχέση :

$$\varepsilon_0 = 23^{\circ}26'21''.448 - 46''.815T - 0''.00059T^2 + 0''.001813T^3$$

όπου η χρονική στιγμή $T = (JD - 2451545.0) / 36525$ μετράται στην κλίμακα του Γήινου Δυναμικού Χρόνου TDT (πρακτικά στην κλίμακα του Γήινου Χρόνου TT).

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο περί χρόνου, η κλόνηση επηρεάζει και τον αστρικό χρόνο. Η εξίσωση των Ισημεριών δίνεται από την παράσταση:

$$Eq. E = \Delta\psi \cos(\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon), \text{ εκφρασμένη σε μονάδες χρόνου.}$$

Από την 1^η Ιανουαρίου 2006 ισχύει ήδη το νέο μοντέλο κλόνησης (MHB2000), που βελτιώνει το μοντέλο 1980 λαμβάνοντας υπ'όψιν την επίδραση της ανελαστικότητας του μανδύα, των ωκεάνιων παλιρροιών και τους μη γραμμικούς όρους που είχαν αγνοηθεί στο προηγούμενο μοντέλο. Το νέο μοντέλο κλόνησης περιλαμβάνει 678 σεληνοηλιακούς όρους και 687 πλανητικούς όρους, που εκφράζονται ως συντελεστές «σε φάση» (in phase) και «εκτός φάσης» (out of phase).

Αριθμητικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των σημαντικότερων όρων του μοντέλου κλόνησης δίνονται στους «Αστρονομικούς Πίνακες».

6.4 Κίνηση του Πόλου

Η θέση του άξονα z του αληθούς ουρανογραφικού (επομένως και του αστρονομικού) συστήματος της ημερομηνίας ως προς τον αντίστοιχο άξονα του γήινου συστήματος ITRS δίνεται από τις παραμέτρους της κίνησης του πόλου (x_p, y_p) , ενώ η γωνία μεταξύ του εαρινού ισημερινού σημείου της ημερομηνίας και του μεσημβρινού του Greenwich δίνεται από τον Αληθή Αστρικό Χρόνο Greenwich θ (GAST).

Επομένως, για τον μετασχηματισμό από το αληθές ουρανογραφικό σύστημα της ημερομηνίας στο γήινο σύστημα απαιτείται η χρήση του πίνακα στροφής:

$$S = R_2(-x_p)R_1(-y_p)R_3(\theta)$$

Επειδή οι γωνίες x_p και y_p είναι πολύ μικρές, όταν εκφραστούν σε ακτίνια ο πίνακας στροφής S δίνεται αναλυτικά, με μεγάλη προσέγγιση:

$$S = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & -x_p \cos \theta - y_p \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta & x_p \sin \theta - y_p \cos \theta \\ x_p & y_p & 1 \end{bmatrix}$$

Οι αστρονομικές συντεταγμένες Λ και Φ , όπως προσδιορίζονται από τις αστρονομικές παρατηρήσεις αναφέρονται στον αληθή (στιγμιαίο) πόλο της ημερομηνίας. Για να χρησιμοποιηθούν σε γεωδαιτικές εφαρμογές (π.χ. για τον υπολογισμό της απόκλισης της κατακορύφου), πρέπει να αναχθούν στον Συμβατικό Πόλο (CIO) του γήινου συστήματος. Η αναγωγή αυτή γίνεται από τις σχέσεις :

$$\Lambda_{CIO} = \Lambda - (x_p \sin \Lambda + y_p \cos \Lambda) \tan \Phi$$

$$\Phi_{CIO} = \Phi - (x_p \cos \Lambda - y_p \sin \Lambda)$$

6.5 Φαινόμενα που οφείλονται στην κίνηση του παρατηρητή

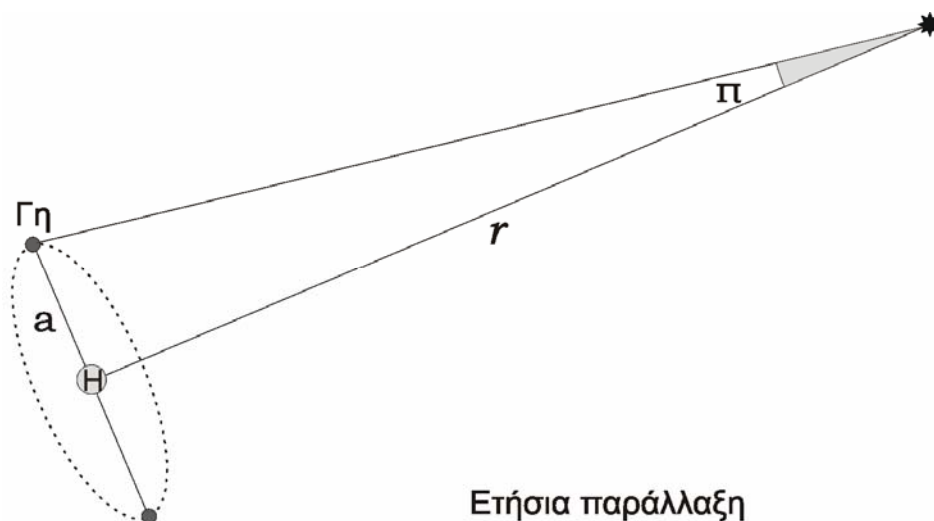
Μια σειρά από άλλα φαινόμενα οφείλονται στην αλλαγή της θέσης ή την ταχύτητα του παρατηρητή σε σχέση με το παρατηρούμενο σώμα και επιβάλουν αντίστοιχες διορθώσεις.

6.5.1 Παράλλαξη

Κατά την παρατήρηση του ίδιου αντικειμένου από δύο διαφορετικές θέσεις, οι **διευθύνσεις** παρατήρησης είναι, φυσικά, διαφορετικές και η διαφορά αυτή εξαρτάται από την απόσταση του αντικειμένου. Το φαινόμενο ονομάζεται γενικά **παράλλαξη (parallax)**, όπως και η γωνία μεταξύ των διευθύνσεων παρατήρησης, όπως αυτή ορίζεται με τις ευθείες από το αντικείμενο προς τις δύο θέσεις παρατήρησης.

Ειδικότερα, τώρα, **ετήσια παράλλαξη (annual parallax)** ενός άστρου είναι η γωνία π υπό την οποία φαίνεται, από το άστρο, η ακτίνα (ο μεγάλος ημιάξονας a) της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο (σχήμα 6.6).

Από το σχήμα 6.6 προκύπτει ότι: $\tan(\pi) = a / r$ και, επειδή $\pi \ll 1$, ισχύει: $\pi = a / r$



Ετήσια παράλλαξη

Σχήμα 6.6

Λόγω της παράλλαξης, τα άστρα φαίνονται να διαγράφουν μικροσκοπικούς κύκλους στον ουρανό στην διάρκεια ενός έτους, με διαστάσεις που είναι αντιστρόφως ανάλογες της απόστασής τους r . Μάλιστα, η μέτρηση της ετήσιας παράλλαξης ενός άστρου είναι ο μόνος άμεσος τρόπος προσδιορισμού της απόστασης του άστρου. Για τον ίδιο λόγο η μονάδα μέτρησης των αποστάσεων στο Σύμπαν είναι το *parsec*, δηλαδή η απόσταση που πρέπει να βρίσκεται ένα σώμα ώστε να 'βλέπει' τον μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς της Γης με γωνία 1 δευτερολέπτου τόξου. Ένα parsec είναι περίπου ίσο με 3×10^{13} km. Το πλησιέστερο προς την Γη άστρο (εκτός από τον Ήλιο, φυσικά), το α_2 Cen, έχει την μεγαλύτερη ετήσια παράλλαξη, ίση με $0''.76$, επομένως βρίσκεται σε απόσταση $r = 1 / 0''.76 = 1.3$ parsec.

Η μετατόπιση που προκαλείται από την παράλλαξη γίνεται κατά μήκος του μέγιστου κύκλου που περιέχει τον Ήλιο και το άστρο, προς την διεύθυνση του Ήλιου, και ισούται με $\pi \sin(\theta)$, όπου θ είναι το τόξο του μέγιστου κύκλου [Ήλιου - άστρου]. Χρησιμοποιώντας τις ορθογώνιες γεωκεντρικές συντεταγμένες X, Y, Z του Ήλιου (που είναι οι αντίθετες των βαρυκεντρικών ορθογωνίων συντεταγμένων της Γης στα μοντέλα του ηλιακού συστήματος), η μεταβολή, λόγω παράλλαξης, των ουρανογραφικών συντεταγμένων δίνεται από τις σχέσεις:

$$\alpha - \alpha_r = \pi [X \sin(\alpha) - Y \cos(\alpha)] \sec(\delta)$$

$$\delta - \delta_r = \pi [X \cos(\alpha) \sin(\delta) + Y \sin(\alpha) \sin(\delta) - Z \cos(\delta)]$$

όπου α_r και δ_r οι γεωκεντρικές ουρανογραφικές συντεταγμένες

Αντίστοιχα, η **γεωκεντρική παράλλαξη (geocentric parallax)** ενός άστρου είναι η γωνία υπό την οποία φαίνεται η ακτίνα της Γης από το άστρο. Η γεωκεντρική παράλλαξη εμφανίζεται επειδή οι παρατηρήσεις προς κάποιο ουράνιο σώμα γίνονται στην επιφάνεια της Γης ενώ οι ουρανογραφικές συντεταγμένες του σώματος αναφέρονται στο κέντρο της. Είναι προφανές ότι η γεωκεντρική παράλλαξη μπορεί να έχει σημασία για παρατηρήσεις πολύ κοντινών σωμάτων (π.χ. πλανητών) αλλά είναι εντελώς αμελητέα για παρατηρήσεις άστρων.

6.5.2 Αποπλάνηση του φωτός

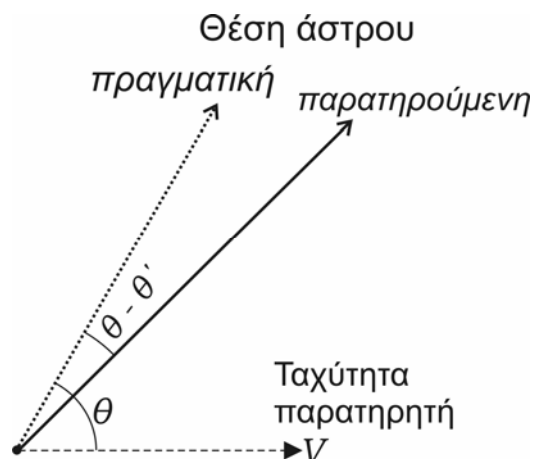
Εξαιτίας της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός, η διεύθυνση παρατήρησης προς ένα σώμα τροποποιείται από την ταχύτητα κίνησης του παρατηρητή. Αυτή η μετατόπιση ονομάζεται, γενικά, **αποπλάνηση (aberration)** του φωτός και εξαρτάται από τον λόγο της ταχύτητας του παρατηρητή προς την ταχύτητα του φωτός. Η μετατόπιση είναι προς τη διεύθυνση κίνησης του παρατηρητή τη στιγμή της παρατήρησης.

Αν ονομάσουμε $\Delta\theta = \theta - \theta'$ την γωνιακή μετατόπιση λόγω αποπλάνησης και V την ταχύτητα του παρατηρητή ($V \ll c$), τότε ισχύει:

$$\sin \Delta\theta = \frac{V}{c} \sin \theta' = \frac{V}{c} \sin(\theta - \Delta\theta)$$

Αναπτύσσοντας σε σειρά προκύπτει:

$$\Delta\theta = \frac{V}{c} \sin \theta - \frac{1}{2} \left(\frac{V}{c} \right)^2 \sin 2\theta + \dots$$



Οι συνιστώσες της μετατόπισης $\Delta\theta$ υπολογίζονται από τις συνιστώσες της ταχύτητας V του παρατηρητή. Αν θεωρηθεί, ως ταχύτητα του παρατηρητή, η μέση ταχύτητα κίνησης της Γης στην τροχιά της γύρω από τον Ήλιο, ο λόγος $k = V / c = 20'' .49552$ είναι η *σταθερά της αποπλάνησης (constant of aberration)*, ενώ η αντίστοιχη μετατόπιση λέγεται **ετήσια αποπλάνηση (annual aberration)**. Οι απαιτούμενες διορθώσεις στις ουρανογραφικές συντεταγμένες εξαρτώνται από την θέση του άστρου (α,δ) αλλά και από τον χρόνο, επειδή αλλάζει συνεχώς διεύθυνση η τροχιακή ταχύτητα V της Γης. Διατηρώντας μόνο τον όρο πρώτου βαθμού του $\Delta\theta$ από το παραπάνω ανάπτυγμα προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\alpha' - \alpha = - (1 / c) [-X' \sin(\alpha) + Y' \cos(\alpha)] \sec(\delta)$$

$$\delta' - \delta = - (1 / c) [-X' \cos(\alpha) \sin(\delta) - Y' \sin(\alpha) \sin(\delta) + Z' \cos(\delta)]$$

όπου X' , Y' και Z' είναι οι χρονικές παράγωγοι (ταχύτητες) των ορθογωνίων συντεταγμένων του Ηλίου (δηλαδή οι αντίθετες συνιστώσες της ταχύτητας της Γης στην τροχιά της).

Αντίστοιχα, **ημερήσια αποπλάνηση (diurnal aberration)** ενός άστρου ονομάζεται η μετατόπιση που οφείλεται στην ημερήσια περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της και του παρατηρητή μαζί με αυτή. Έχει ως συνέπεια να φαίνονται οι αστέρες μετατοπισμένοι κατά μήκος της φαινόμενης ημερήσιας τροχιάς τους προς μεγαλύτερες τιμές ορθής αναφοράς. Αυτό σημαίνει ότι κατά την παρατήρηση μεσημβρινών διαβάσεων οι αστέρες φαίνεται ότι μεσουρανούν αργότερα από την ώρα που πραγματικά αυτό συμβαίνει.

Η διόρθωση της επίδρασης της ημερήσιας αποπλάνησης γίνεται είτε στην τιμή του χρόνου παρατήρησης που αντιστοιχεί στην μεσουράνηση, είτε στο αστρονομικό μήκος Λ , γιατί στη διεύθυνση αυτή γίνεται η κίνηση της γης και του παρατηρητή. Η μέγιστη

τιμή της διόρθωσης αυτής είναι 0.021 sec, περίπου 0''.32. Στο αστρονομικό πλάτος Φ , η διόρθωση της ημερήσιας αποπλάνησης είναι μηδέν.

6.6 Αστρονομική διάθλαση

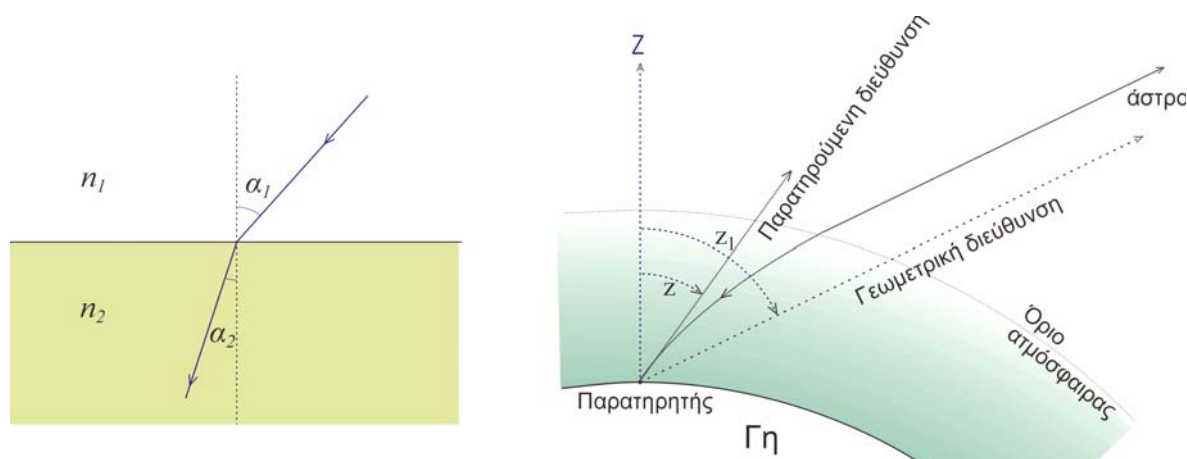
Είναι γνωστό ότι, όταν το φως περνά την διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών στα οποία κινείται με διαφορετική ταχύτητα, εκτρέπεται από την ευθύγραμμη πορεία του, δηλαδή διαθλάται. Η εκτροπή αυτή περιγράφεται ποσοτικά από τον νόμο του Snell:

$$n_1 \sin a_1 = n_2 \sin a_2$$

όπου n_1, n_2 είναι οι δείκτες διάθλασης των υλικών και a_1, a_2 οι αντίστοιχες γωνίες (πρόσπτωσης και διάθλασης) στην διαχωριστική επιφάνεια.

Ανάμεσα σ' ένα άστρο και έναν παρατηρητή στην επιφάνεια της Γης παρεμβάλλεται η ατμόσφαιρα, στην οποία το φως κινείται με ελαφρά διαφορετική ταχύτητα απ' ότι στο κενό. Γι' αυτό, η πορεία μιας φωτεινής ακτίνας από το άστρο προς τον παρατηρητή δεν παραμένει ευθύγραμμη. Η ατμόσφαιρα της Γης, όμως, δεν είναι ομογενές μέσο σ' όλη την έκτασή της: τοπικά, η πυκνότητά της μεταβάλλεται, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Συνεπώς, ο (τοπικός) δείκτης διάθλασης και το μέγεθος της εκτροπής της φωτεινής ακτίνας δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια.

Παρ' όλα αυτά, ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της εκτροπής είναι δυνατόν να γίνει, με βάση τα γενικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας (ατμοσφαιρικά μοντέλα) και τις τοπικές συνθήκες, στην θέση του παρατηρητή. Τα κύρια χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται είναι: η σφαιρική συμμετρία και η συνεχής ελάττωση της πυκνότητας (επομένως και του δείκτη διάθλασης) με το υψόμετρο. Αποτέλεσμα αυτών είναι η βαθμιαία καμπύλωση της φωτεινής ακτίνας, με τα κοίλα προς τα κάτω, όσο αυτή πλησιάζει τον παρατηρητή στην επιφάνεια της Γης (σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7

Επειδή το συνολικό ύψος της ατμόσφαιρας είναι αμελητέο σε σχέση με την απόσταση των άστρων, θεωρούμε ότι η φωτεινή ακτίνα, στο ευθύγραμμο τμήμα της εκτός ατμόσφαιρας, είναι παράλληλη με την ευθεία που συνδέει γεωμετρικά τον παρατηρητή με το άστρο. Επομένως, η ζενίθια απόσταση z_1 , στην οποία θα έβλεπε ο παρατηρητής το άστρο αν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα (γεωμετρική θέση του άστρου) είναι μεγαλύτερη

από αυτήν που παρατηρεί στην πραγματικότητα (γωνία z), η οποία προσδιορίζεται από την εφαιπτομένη στην πορεία της φωτεινής ακτίνας στο σημείο που βρίσκεται ο παρατηρητής. Η διαφορά:

$$R = z_1 - z$$

των δύο γωνιών ονομάζεται **αστρονομική διάθλαση** (*astronomical refraction*) και είναι η γωνία που πρέπει να προστεθεί στην παρατηρούμενη τιμή της ζενίθιας απόστασης για να προκύψει η πραγματική (γεωμετρική) τιμή της.

Μια προσεγγιστική τιμή της διάθλασης R μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια του νόμου του Snell σ' ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο. Επειδή είναι αδύνατο να μετρηθούν οι συνθήκες κατά μήκος όλης της διαδρομής της φωτεινής ακτίνας στην ατμόσφαιρα, θεωρείται πως αυτές είναι συνάρτηση των συνθηκών στο σημείο παρατήρησης. Αυτή η υπόθεση, που ισχύει για διαδρομές κοντά στην κατακόρυφο, επιτρέπει τον υπολογισμό μιας προσεγγιστικής τιμής της αστρονομικής διάθλασης από την ακόλουθη σχέση, που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ζενίθιες αποστάσεις μέχρι 70° περίπου:

$$R = \alpha(1 - \beta)\tan z - \alpha\left(\beta - \frac{\alpha}{2}\right)\tan^3 z$$

όπου: z = η παρατηρούμενη ζενίθια απόσταση

$\alpha = n - 1$, n = δείκτης διάθλασης στο σημείο παρατήρησης

$\beta = \frac{L}{R}$, R = ακτίνα της Γης

L = το ύψος μιας ομογενούς ατμόσφαιρας, με πυκνότητα όση αυτή στο σημείο παρατήρησης, που θα εξασκούσε πίεση ίση με την πραγματικά μετρούμενη εκεί.

Η ποσότητα α είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λ της ακτινοβολίας και της πυκνότητας της ατμόσφαιρας (επομένως, συνάρτηση της πίεσης p και της θερμοκρασίας θ) και η β είναι επίσης συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Για κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ($p = 1013.25\text{mbar}$ και $\theta = 0^\circ \text{C}$), για μονοχρωματικό κίτρινο φως ($\lambda = 0.58 \mu\text{m}$, στην περιοχή της μέγιστης ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού) και, φυσικά, για ζενίθιες αποστάσεις μέχρι 70° , η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$R_0 = 60''.34 \tan z - 0''.0669 \tan^3 z$$

Η σχέση αυτή δίνει την κανονική αστρονομική διάθλαση. Η πραγματική διάθλαση μπορεί να υπολογιστεί, με την βοήθεια του νόμου των τελείων αερίων, από την σχέση:

$$R = R_0 \frac{p}{1013.25} \cdot \frac{273}{273 + \theta}$$

όπου R_0 είναι η κανονική διάθλαση, p η ατμοσφαιρική πίεση στο σημείο παρατήρησης (εκφρασμένη σε mbar) και θ η θερμοκρασία στο ίδιο σημείο (εκφρασμένη σε βαθμούς Κελσίου).

Ο ακόλουθος πίνακας δίνει μερικές ενδεικτικές τιμές της αστρονομικής διάθλασης R , για πίεση $p = 990 \text{ mbar}$ και θερμοκρασία $\theta = 20^\circ \text{C}$ στο σημείο παρατήρησης.

Ζενίθια απόσταση z_1	Αστρονομική διάθλαση R
0°	0''
10°	10''
20°	20''
30°	32''
40°	46''
50°	65'' $\approx 1.1'$
60°	95'' $\approx 1.6'$
70°	150'' $\approx 2.5'$
90°	$\approx 32'$

Όπως φαίνεται στον πίνακα, το σφάλμα στις παρατηρήσεις είναι σημαντικό αν δεν γίνει διόρθωση για την επίδραση της διάθλασης. Επιπλέον, η τιμή της διάθλασης από τις παραπάνω σχέσεις είναι προσεγγιστική και το σφάλμα μεγαλώνει με την ζενίθια απόσταση.

6.7 Οι θέσεις των αστέρων

Λόγω των διαφορετικών διευθύνσεων παρατήρησης προς ένα ουράνιο σώμα, που μπορεί να οφείλονται σε αλλαγή του κέντρου του συστήματος αναφοράς, σε αλλαγή της θέσης ή της κίνησης του παρατηρητή και στα φαινόμενα που αναφέρθηκαν, διακρίνονται διάφορες τιμές των ουρανογραφικών συντεταγμένων των αστέρων που, συμβατικά, ονομάζονται **θέσεις** (σχήμα 6.8). Αυτές είναι :

- **Παρατηρούμενη θέση (observed place)** ενός ουρανού σώματος: είναι η πραγματική θέση, όπως αυτή προσδιορίζεται από απευθείας αναγνώσεις (διορθωμένες από συστηματικά σφάλματα) κάποιου οργάνου.
- **Φαινόμενη θέση (apparent place)** ενός ουρανού σώματος: είναι η γεωκεντρική του θέση, που αναφέρεται στον αληθή ισημερινό και στο αληθές ισημερινό σημείο Υ για τη στιγμή που παρατηρήθηκε το ουράνιο σώμα. Διαφέρει από την παρατηρούμενη γιατί διορθώνεται για τις επιδράσεις της αστρονομικής διάθλασης, της ημερήσιας αποπλάνησης και της γεωκεντρικής παράλλαξης. Είναι η θεωρητική θέση που θα έβλεπε το ουράνιο σώμα ένας παρατηρητής που θα βρισκόταν στο κέντρο μάζας της Γης, χωρίς ατμόσφαιρα, σ' ένα σύστημα συντεταγμένων επηρεαζόμενο από την μετάπτωση, την κλόνηση και την κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο.
- **Αληθής θέση (true place)** ενός ουρανού σώματος: είναι η ηλιοκεντρική του θέση, που αναφέρεται στον αληθή ισημερινό και στο αληθές ισημερινό σημείο Υ της στιγμής της παρατήρησης. Διαφέρει από την φαινόμενη θέση γιατί διορθώνεται για τις επιδράσεις της ετήσιας αποπλάνησης και της ετήσιας παράλλαξης. Είναι η

θέση που θα έβλεπε το ουράνιο σώμα ένας φανταστικός παρατηρητής, που θα βρισκόταν στο κέντρο μάζας του ηλιακού συστήματος, σ' ένα σύστημα συντεταγμένων επηρεαζόμενο από την μετάπτωση και κλόνηση.

- **Μέση θέση (mean place)** ενός ουρανίου σώματος: είναι η ηλιοκεντρική θέση του, που αναφέρεται σε κάποιον ορισμένο μέσο ισημερινό και μέσο ισημερινό σημείο Υ , για κάποια εποχή. Διαφέρει από την αληθή θέση γιατί διορθώνεται για την επίδραση της κλόνησης. Είναι η θέση που θα έβλεπε το ουράνιο σώμα ένας φανταστικός παρατηρητής, που θα βρισκόταν στο κέντρο μάζας του ηλιακού συστήματος, σ' ένα σύστημα συντεταγμένων επηρεαζόμενο μόνο από τη μετάπτωση.

Στους καταλόγους, όπου αναφέρονται οι θέσεις των αστερών, δίνεται η μέση θέση σε κάποια δεδομένη εποχή και σύστημα αναφοράς (π.χ. J2000 και ICRS).

6.8 Υπολογισμός των φαινόμενων συντεταγμένων

Κατά την επεξεργασία των αστρονομικών παρατηρήσεων είναι απαραίτητη η γνώση των φαινόμενων ουρανογραφικών συντεταγμένων (a_{app}, δ_{app}) των άστρων την στιγμή της παρατήρησης. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει με βάση την θέση και τα άλλα στοιχεία του καταλόγου, που χρησιμοποιείται κάθε φορά, σύμφωνα με την διαδικασία που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Ο ακριβέστερος αστρομετρικός κατάλογος που υπάρχει σήμερα είναι ο κατάλογος Tycho2, που βασίζεται στα δεδομένα της διαστημικής αποστολής HIPPARCOS (1989-1993) για τις θέσεις των αστερών και σε δεδομένα από 144 καταλόγους διαφόρων εποχών για τον προσδιορισμό των ίδιων κινήσεων. Για την παράλλαξη (απόσταση) των λαμπρότερων άστρων (117955 από ένα σύνολο 2539913), μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα του κύριου καταλόγου HIPPARCOS. Ο κατάλογος Tycho2 αναφέρεται στο σύστημα ICRS την εποχή J2000.

Βήμα 1. Η στιγμή της παρατήρησης εκφράζεται στην κλίμακα του Βαρυκεντρικού Δυναμικού Χρόνου TDB (πρακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Γήινος Χρόνος TT).

Βήμα 2. Από αστρονομικούς πίνακες λαμβάνεται η βαρυκεντρική θέση της Γης E_B (σε αστρονομικές μονάδες) και η ταχύτητα της \dot{E}_B (σε αστρονομικές μονάδες ανά ημέρα) την χρονική στιγμή της παρατήρησης, ως προς το ICRS.

Η βαρυκεντρική θέση (q) του άστρου την εποχή J2000 ως προς το ICRS δίνεται από το μοναδιαίο διάνυσμα :

$$q = (\cos a_0 \cos \delta_0, \sin a_0 \cos \delta_0, \sin \delta_0)$$

όπου a_0, δ_0 είναι οι ουρανογραφικές συντεταγμένες του άστρου την εποχή J2000 ως προς το ICRS, δηλαδή οι συντεταγμένες του καταλόγου.

Το διάνυσμα κίνησης του άστρου (m_x, m_y, m_z), εκφρασμένο σε ακτίνια ανά αιώνα, δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}
m_x &= -\mu_\alpha \cos \delta_0 \sin a_0 - \mu_\delta \sin \delta_0 \cos a_0 + \nu \pi \cos \delta_0 \cos a_0 \\
m_y &= \mu_\alpha \cos \delta_0 \cos a_0 - \mu_\delta \sin \delta_0 \sin a_0 + \nu \pi \cos \delta_0 \sin a_0 \\
m_z &= \mu_\delta \sin \delta_0 + \nu \pi \sin \delta_0
\end{aligned}$$

όπου αυτές οι εκφράσεις λαμβάνουν υπόψη την ακτινική ταχύτητα (ν) σε αστρονομικές μονάδες (au) ανά αιώνα, την ίδια κίνηση (μ_α, μ_δ) στην ορθή αναφορά και απόκλιση σε ακτίνια ανά αιώνα και την παράλλαξη (π) σε ακτίνια.

Υπολογίζεται το γεωκεντρικό διάνυσμα θέσης του άστρου τη ζητούμενη εποχή από τη σχέση:

$$P = q + Tm - \pi E_B$$

όπου $T = (JD - 2451545.0) / 36525$ το διάστημα, σε Ιουλιανούς αιώνες, από την εποχή J2000 μέχρι την στιγμή της παρατήρησης. Η σχέση αυτή υλοποιεί την αναγωγή για την κίνηση του άστρου και την ετήσια παράλλαξη.

Υπολογίζεται το μοναδιαίο γεωκεντρικό διάνυσμα θέσης (p) του άστρου από την σχέση: $p = P / |P|$

Βήμα 3. Υπολογίζεται η διεύθυνση (p_2) στο γεωκεντρικό πλαίσιο, που κινείται με την στιγμιαία ταχύτητα (V) της Γης ως προς το αντίστοιχο γεωκεντρικό ακίνητο (αδρανειακό) πλαίσιο, από τη σχέση :

$$p_2 = \frac{\beta^{-1} p + \left(1 + \frac{p * V}{1 + \beta^{-1}}\right) V}{1 + p * V}$$

όπου $V = \dot{E}_B / c = 0.0057755 \dot{E}_B$ και $\beta = (1 - V^2)^{-1/2}$. Η σχέση αυτή υλοποιεί την αναγωγή για την ετήσια αποπλάνηση.

Το διάνυσμα p_2 εκφράζει την γεωκεντρική θέση του άστρου την στιγμή της παρατήρησης στο σύστημα ICRS της εποχής J2000. Για να εκφραστεί η θέση αυτή στο αληθές σύστημα της ημερομηνίας απαιτείται αναγωγή για την μετάπτωση και την κλόνηση. Το μοντέλο μετάπτωσης και κλόνησης ορίζεται στο Δυναμικό σύστημα αναφοράς J2000, που αναφέρεται στο μέσο Εαρινό Ισημερινό σημείο και στον μέσο Ισημερινό της εποχής J2000. Το σύστημα αυτό δεν ταυτίζεται με το ICRS αλλά έχει μια διαφορά στον προσανατολισμό της τάξεως των 0''.02. Επομένως, πριν εφαρμοστούν οι πίνακες στροφής για την μετάπτωση και την κλόνηση, είναι απαραίτητο να μετατραπούν οι θέσεις που είναι εκφρασμένες στο ICRS στις αντίστοιχες θέσεις στο δυναμικό σύστημα J2000. Ο πίνακας στροφής αυτού του μετασχηματισμού ονομάζεται **μετάθεση του πλαισίου αναφοράς (frame bias)**, συμβολίζεται με B και είναι:

$$B = \begin{bmatrix} 0.999999999999942 & -0.0000000707827974 & 0.0000000805621715 \\ 0.0000000707827948 & 0.999999999999969 & 0.0000000330604145 \\ -0.0000000805621738 & -0.0000000330604088 & 0.999999999999962 \end{bmatrix}$$

Έτσι, ένα διάνυσμα θέσης r εκφρασμένο στο ICRS μπορεί να μετασχηματιστεί στο αντίστοιχο διάνυσμα r_0 στο δυναμικό σύστημα J2000 μέσω της σχέσης :

$$r_0 = Br$$

Βήμα 4. Από τους αστρονομικούς πίνακες ή με υπολογισμό προσδιορίζονται οι πίνακες P της μετάπτωσης και N της κλόνησης. Το ζητούμενο διάνυσμα των φαινόμενων συντεταγμένων του άστρου υπολογίζεται από τη σχέση :

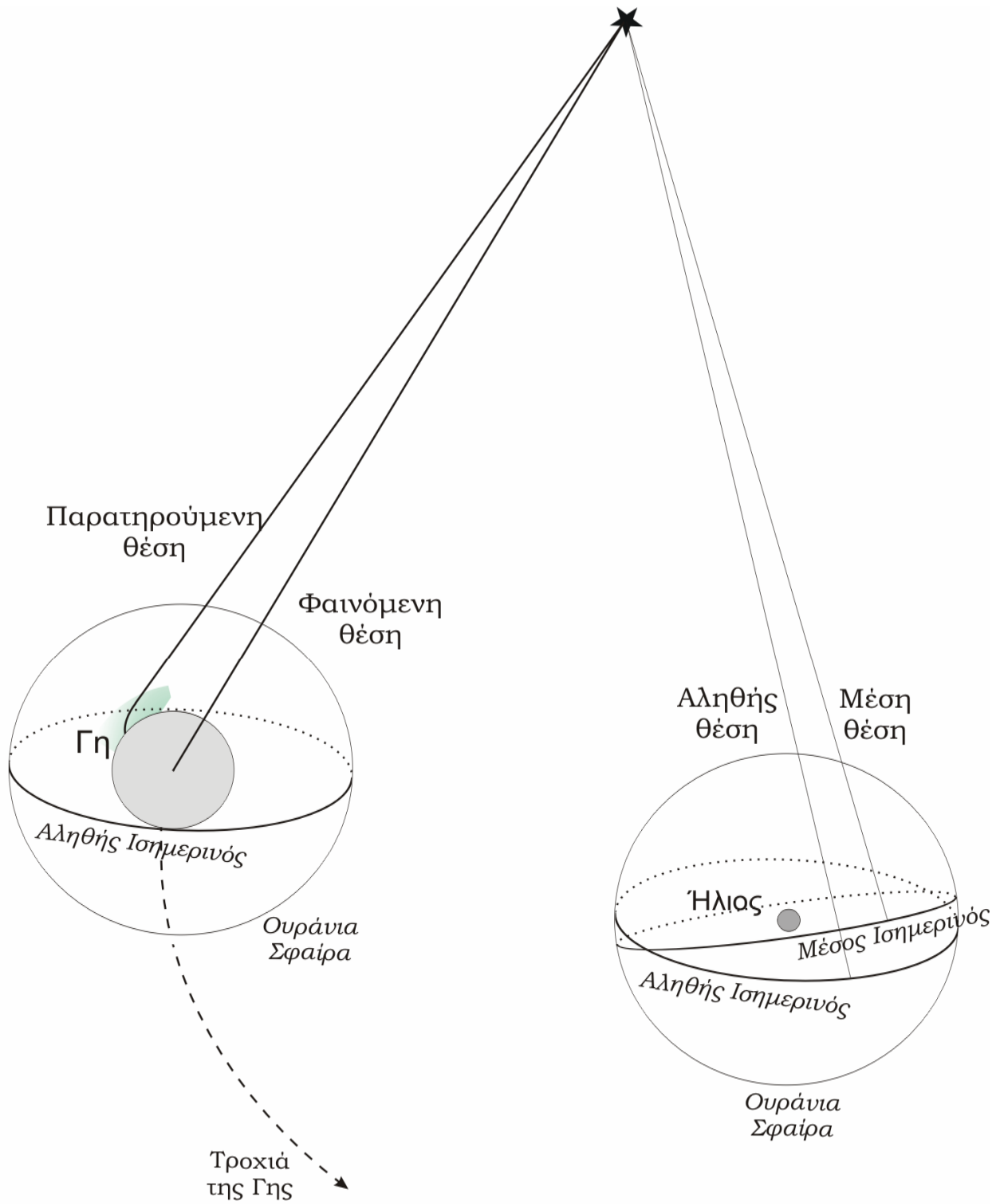
$$p_3 = NP B p_2$$

Το διάνυσμα (p_3) δίνει τις (ορθογώνιες) φαινόμενες συντεταγμένες του άστρου στο αληθές ουρανογραφικό σύστημα της δεδομένης χρονικής στιγμής. Ο υπολογισμός των αντίστοιχων σφαιρικών συντεταγμένων γίνεται από τις σχέσεις:

$$\delta_{app} = \arcsin \frac{p_{3z}}{|p_3|} \quad , \quad \alpha_{app} = \arctan \frac{p_{3y}}{p_{3x}}$$

Ανακεφαλαίωση

- Μια σειρά από κινήσεις και φαινόμενα μεταβάλουν τις τιμές των ουρανογραφικών συντεταγμένων των άστρων αλλά και τις αστρονομικές συντεταγμένες ενός παρατηρητή.
- Η μετάπτωση και η κλόνηση προκαλούν αλλαγή της διεύθυνσης του άξονα περιστροφής της Γης στον χώρο, με συνέπεια μια στροφή του ουρανογραφικού συστήματος. Το ομαλό μέρος της στροφής αυτής είναι η μετάπτωση (συνάρτηση χρονικού διαστήματος) ενώ το περιοδικό μέρος της μεταβολής είναι η κλόνηση (συνάρτηση χρονικής στιγμής).
- Η κίνηση του Πόλου είναι η ψευδο-περιοδική μετατόπιση της διεύθυνσης του άξονα περιστροφής ως προς τον στερεό φλοιό της Γης, με συνέπεια αντίστοιχη μεταβολή των αστρονομικών συντεταγμένων ενός τόπου.
- Τα άστρα έχουν μια πραγματική κίνηση στο χώρο και η συνιστώσα της στην επιφάνεια της ουράνιας σφαίρας (ίδια κίνηση μ) προκαλεί αλλαγή και στις δύο ουρανογραφικές συντεταγμένες.
- Λόγω της ετήσιας περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο, ο γήινος παρατηρητής παρατηρεί τα κοντινότερα άστρα να διαγράφουν μικρές ελλείψεις στον ουρανό. Το φαινόμενο είναι η παράλλαξη, που είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης κάθε άστρου.
- Η ταχύτητα του παρατηρητή (πάνω στην κινούμενη Γη) προκαλεί μια φαινομενική μετατόπιση κάθε άστρου προς την διεύθυνση της κίνησης. Το φαινόμενο αυτό λέγεται αποπλάνηση του φωτός και η μετατόπιση είναι ανάλογη του πηλίκου της ταχύτητας του παρατηρητή προς την ταχύτητα του φωτός.
- Η παρουσία της ατμόσφαιρας και, ειδικά, ο μεταβαλλόμενος δείκτης διάθλασης προκαλεί μια καμπύλωση των οπτικών ακτινών, με συνέπεια τα άστρα να παρατηρούνται σε μικρότερη ζενίθια γωνία από την πραγματική. Το φαινόμενο ονομάζεται αστρονομική διάθλαση, εξαρτάται έντονα από την ζενίθια γωνία, μπορεί να διορθωθεί μόνο προσεγγιστικά και είναι σημαντικός παράγοντας για την επιλογή των μεθόδων παρατήρησης.



Οι θέσεις των άστρων

Σχήμα 6.8

