

5. ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΓΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Οι κύριες κινήσεις της Γης είναι: μια τροχιακή κίνηση του κέντρου μάζας γύρω από τον Ήλιο και μια περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα που περνά από το κέντρο μάζας της Γης. Αυτές οι δύο κινήσεις, που καθορίζουν τα θεμελιώδη πλαίσια αναφοράς, διαταράσσονται από βαρυτικές επιδράσεις των άλλων μελών του ηλιακού συστήματος, ενώ η καθεμία επίσης διαταράσσει την άλλη.

Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο γίνεται κατά μήκος μιας ελλειπτικής τροχιάς (εκλειπτική), στην οποία βασίζεται ο ορισμός της αφετηρίας του ουρανογραφικού συστήματος. Το επίπεδο της εκλειπτικής μετακινείται ελαφρά λόγω των επιδράσεων των άλλων πλανητών (*πλανητική μετάπτωση*).

Η περιστροφική κίνηση της Γης μπορεί να αναλυθεί σε πέντε συνιστώσες:

- 1) μια ομαλή περιστροφή γύρω από τον άξονα
- 2) μια εξαναγκασμένη αιώνια κίνηση του άξονα (*μετάπτωση*)
- 3) περιοδικές κινήσεις του άξονα (*κλόνηση*)
- 4) την *κίνηση του πόλου* (*κίνηση Euler* ή *κίνηση Chandler*)
- 5) ακαθόριστες – ανώμαλες κινήσεις του άξονα

Εάν τα υπόλοιπα σώματα που προκαλούν τις διαταραχές δεν υπήρχαν και αν η Γη ήταν ένα συμμετρικό συμπαγές σώμα, η κίνηση της Γης (ως προς το κέντρο μάζας της) θα ήταν μια περιστροφή γύρω από έναν σταθερό άξονα στο χώρο, με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Στην πραγματικότητα, οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις και η δομή της Γης μεταβάλλουν αυτή την ιδεατή κίνηση και προκαλούν διαταραχές, τόσο στον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής όσο και στη γωνιακή ταχύτητα. Οι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για αυτές τις διαταραχές είναι οι μεταβολές στην συνολική στροφορμή (λόγω των εξωτερικών ροπών) και οι μεταβολές στον τανυστή αδρανείας της Γης (λόγω παραμορφώσεων ή των ατμοσφαιρικών μετακινήσεων μεγάλης κλίμακας ή των κινήσεων εντός του πυρήνα).

Ο παράγοντας που επηρεάζει κυρίως την περιστροφή της Γης είναι η συνδυασμένη βαρυτική δύναμη από τον Ήλιο και τη Σελήνη (σεληνοηλιακή παλιρροιακή δύναμη). Λόγω της επιπλάτυνσης της Γης, αυτή η δύναμη ασκεί μια ροπή στη Γη, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση της Σελήνης και του Ήλιου ως προς τη Γη. Επίσης προκαλεί παλίρροιες στους ωκεανούς και την ξηρά, λόγω της μή στερεής κατάστασης της Γης και έτσι παράγονται περιοδικές επίγειες παραμορφώσεις.

Οι διαταραχές στην περιστροφή της Γης γύρω από το κέντρο μάζας της μπορούν να περιγραφούν από μια αιώνια επιβράδυνση, από περιοδικές μεταβολές της γωνιακής ταχύτητας του άξονα περιστροφής, από την μετάπτωση και την κλόνηση του άξονα περιστροφής και από την κίνηση του άξονα περιστροφής ως προς το στερεό φλοιό της Γης, που ονομάζεται ημερήσια κίνηση του πόλου και αποτελεί μέρος του συνολικού φαινομένου της κίνησης του πόλου.

Η αιώνια επιβράδυνση, που είναι της τάξης των 2 msec/αιώνα για το μήκος της μέρας, οφείλεται στην απώλεια κινητικής ενέργειας της Γης, λόγω των τριβών των παλιρροιών στον στερεό φλοιό.

Οι περιοδικές μεταβολές στο ρυθμό περιστροφής, με μέγεθος της τάξης του 0.1msec, οφείλονται σε παλίρροιες που προκαλούν μια παραμόρφωση της Γης που αλλάζει την πολική ροπή αδράνειας της. Τα πλάτη τους εξαρτώνται από την ελαστικότητα της Γης και από την ύπαρξη των ωκεανών και του ρευστού πυρήνα στο εσωτερικό της Γης.

Μόνο η μετάπτωση δεν εξαρτάται από την εσωτερική δομή της Γης, ενώ η κλόνηση εξαρτάται από αυτή τη δομή.

5.2 Παράμετροι προσανατολισμού της Γης

Οι διαταραχές στην περιστροφή της Γης εκφράζονται με μια ομάδα παραμέτρων που λέγονται **Παράμετροι προσανατολισμού της Γης (Earth Orientation Parameters)** $\{x_p, y_p, \delta\psi, \delta\epsilon, UT1-UTC\}$, όπου x_p, y_p είναι οι επίγειες συντεταγμένες του ουράνιου πόλου, $\delta\psi, \delta\epsilon$ είναι οι χωρικές μεταθέσεις στο μήκος και τη λόξωση του ουράνιου πόλου ως προς την προβλεπόμενη θέση του από το μοντέλο κλόνησης και $UT1-UTC$ είναι η διαφορά Παγκόσμιου Χρόνου και Συντονισμένου Παγκόσμιου Χρόνου. Στις επόμενες ενότητες θα περιγραφούν τα φαινόμενα με τα οποία σχετίζονται οι παράμετροι προσανατολισμού της Γης καθώς και οι επιπτώσεις των μεταβολών τους.

Ιστορικά, οι οπτικές αστρομετρικές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστεί το σχήμα και η στροφορμή της Γης στον 18^ο αιώνα και τα κύρια στοιχεία των περιστροφικών μεταβολών, συμπεριλαμβανομένων της κίνησης του πόλου και της μεταβολής του ρυθμού περιστροφής στον 19^ο αιώνα. Σήμερα χρησιμοποιούνται τεχνικές δορυφορικής γεωδαισίας όπως VLBI, SLR, LLR, GPS, από τις οποίες τα πιο ακριβή δεδομένα προέρχονται από το VLBI και SLR.

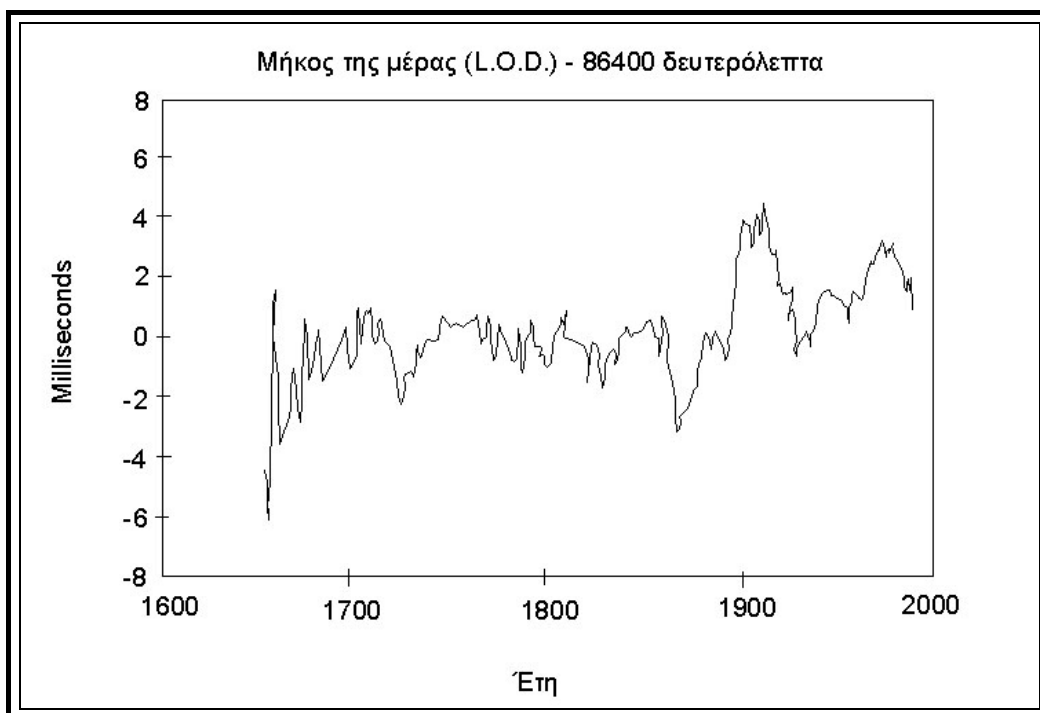
Ο προσδιορισμός της περιστροφής της Γης είναι μια περίπλοκη διαδικασία. Δεν παρατηρείται άμεσα αλλά εκτιμώνται οι παράμετροι του μοντέλου των έμμεσων παρατηρήσεων. Όλα τα συστήματα και οι τεχνικές παρατήρησης εξαρτώνται από την ύπαρξη παρατηρούμενων στόχων, η θέση των οποίων είναι γνωστή σε κάποιο πλαίσιο αναφοράς. Αυτοί οι στόχοι μπορεί να είναι είτε άστρα, είτε ραδιοπηγές, είτε τεχνητοί δορυφόροι είτε η Σελήνη. Οι παρατηρήσεις προς τα αντικείμενα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κίνησης της Γης. Στη συνέχεια, από την κίνηση αυτή αφαιρούνται όλες οι προβλέψιμες κινήσεις (μετάπτωση, κλόνηση, τεκτονικές κινήσεις των μεγάλων «ηπειρωτικών» πλακών, παλίρροιες κλπ.). Η κίνηση που απομένει οφείλεται σε μεταβολές του χρόνου $UT1-UTC$ και στην κίνηση του πόλου.

5.3 Μεταβολές της γωνιακής ταχύτητας της Γης

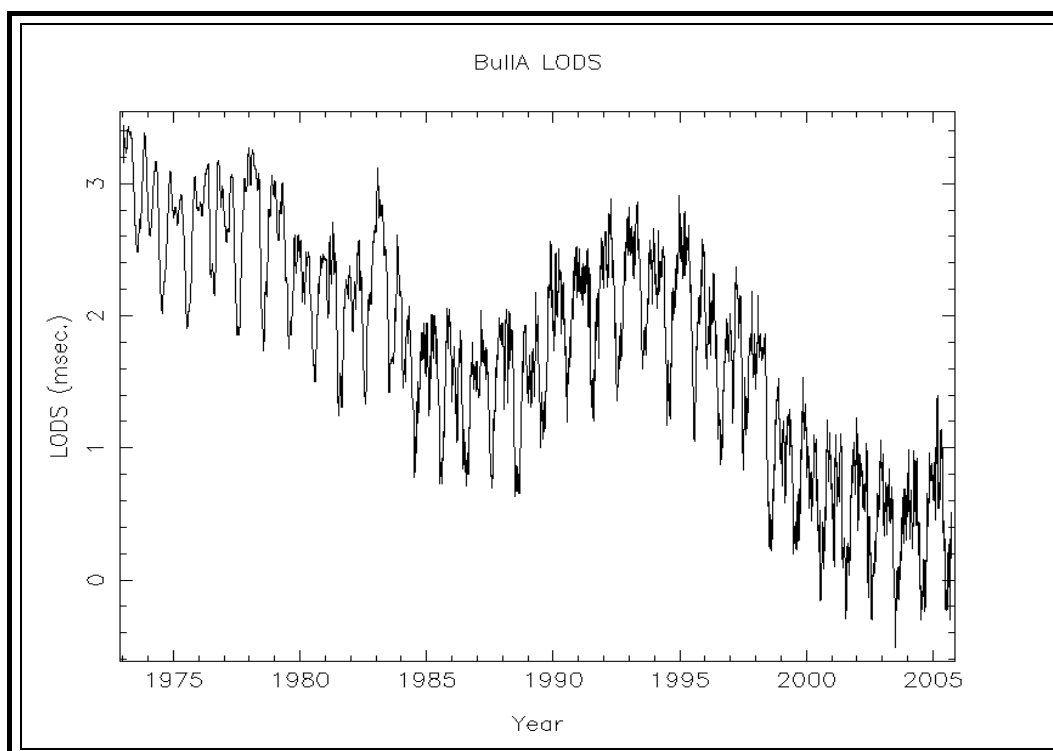
Η γωνιακή ταχύτητα της Γης δεν παραμένει σταθερή. Έχουν διαπιστωθεί εποχιακές περιοδικές μεταβολές από διάφορα αίτια, μια αιώνια επιβράδυνση εξ αιτίας των παλιρροιών, καθώς και άλλες μικρότερες και ακανόνιστες μεταβολές.

Οι μεταβολές αυτές περιγράφονται από το **Μήκος της Ημέρας (Length of the Day)** που ορίζεται ως η διάρκεια της ηλιακής μέρας στην κλίμακα του ατομικού χρόνου.

Η μεταβολή του LOD από το 1650 έως σήμερα φαίνεται στο σχήμα 5.1, ενώ στο σχήμα 5.2 φαίνεται η μεταβολή του LOD από το 1975 ως το 2005.



Σχήμα 5.1



Σχήμα 5.2

Οι μεταβολές στο μήκος της ημέρας προέρχονται από μεγάλες ανακατανομές μάζας, την κίνηση στο εσωτερικό της Γης, τους ανέμους και τα ωκεάνια ρεύματα. Γενικά, σε κλίμακα χρόνου μερικών ετών και μεγαλύτερη, οι αλλαγές στην περιστροφή της Γης οφείλονται σε επιδράσεις από τον μανδύα και τον πυρήνα, ενώ σε μικρότερες κλίμακες χρόνου οι αλλαγές οφείλονται σε κλιματικές μεταβολές.

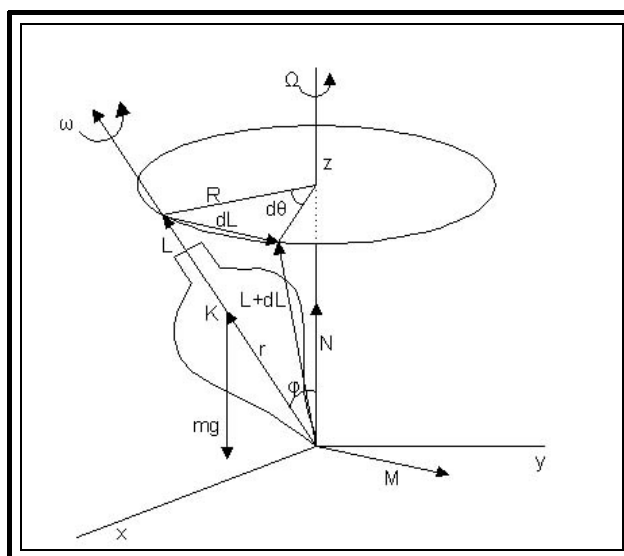
Οι μεταβολές στην περιστροφή της Γης μπορεί επίσης να οφείλονται είτε σε μεταβολές της στροφορμής λόγω της επίδρασης εξωτερικών ροπών (ηλιακές και σεληνιακές βαρυτικές ροπές στο Ισημερινό εξόγκωμα, παλίρροιες ξηράς και θάλασσας, άνεμοι), είτε σε μεταβολές του τανυστή αδράνειας (σεισμοί, μεταβολές της μέσης στάθμης της θάλασσας, ανακατανομές των αέριων μαζών) είτε σε εσωτερική ανακατανομή της στροφορμής (άνεμοι, αλληλεπιδράσεις του μανδύα και του πυρήνα). Οι βασικοί όροι που προκύπτουν από αρμονική ανάλυση των δεδομένων, καταδεικνύουν την ύπαρξη δύο όρων, με μια ετήσια και ημιετήσια περίοδο. Αυτοί οι όροι οφείλονται στη μεταβολή της στροφορμής της Γης που σχετίζεται με την κυκλοφορία των ανέμων.

5.4 Διαταραχές της διεύθυνσης του άξονα περιστροφής της Γης

Οι διαταραχές της διεύθυνσης του άξονα περιστροφής της Γης στον χώρο είναι η *μετάπτωση* (*precession*) και η *κλόνηση* (*nutation*). Η γνώση των φαινομένων αυτών είναι θεμελιώδους σημασίας γιατί ο άξονας περιστροφής της Γης αποτελεί την βασική διεύθυνση του ουρανογραφικού και του αστρονομικού συστήματος.

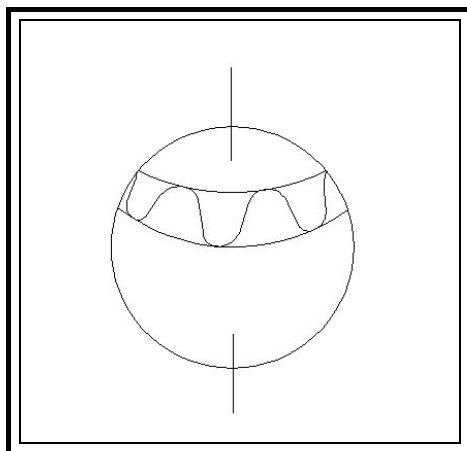
Η μετάπτωση και η κλόνηση του άξονα περιστροφής της Γης αποτελούν περίπτωση του γενικού φαινομένου της μετάπτωσης και κλόνησης, το οποίο εμφανίζεται ως το αποτέλεσμα ροπής που ενεργεί κάθετα προς την αρχική στροφορμή ενός σώματος.

Παράδειγμα του φαινομένου της μετάπτωσης έχουμε σε μια σβούρα που περιστρέφεται γύρω από τον άξονα συμμετρίας της, όταν αυτός σχηματίζει γωνία ϕ με την κατακόρυφη διεύθυνση (άξονας z στο σχήμα 5.3). Τότε, η ροπή M του ζεύγους δυνάμεων «βάρος σβούρας (mg) – αντίδραση επιπέδου (N)», κάθετα στην αρχική στροφορμή L , προκαλεί περιστροφή γύρω από τον άξονα z με γωνιακή ταχύτητα Ω .



Σχήμα 5.3

Η γωνία φ δεν μένει σταθερή κατά τη διάρκεια της μετάπτωσης αλλά μεταβάλλεται ανάμεσα σε δυο ακραίες τιμές. Η άκρη του διανύσματος L ταλαντώνεται ανάμεσα σε δύο κύκλους κάθετους στον άξονα z . Αυτή η ταλάντωση του άξονα ονομάζεται κλόνηση και η μορφή της φαίνεται στο σχήμα 5.4:



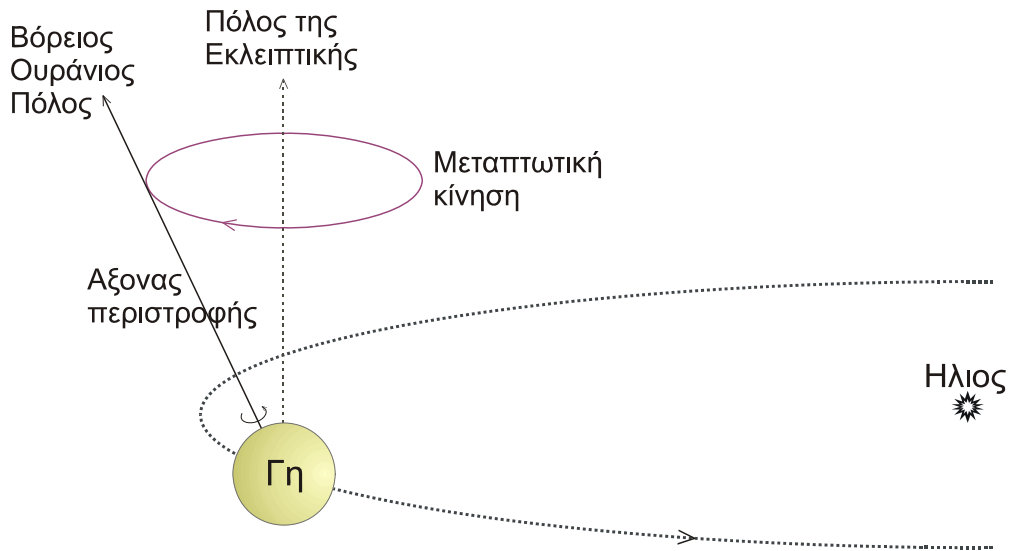
Σχήμα 5.4

Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται και στην περιστροφή της Γης. Η μετάπτωση και η κλόνηση οφείλονται σε συνδυασμό ελκτικών δυνάμεων από τον Ήλιο και τη Σελήνη, οι οποίες προκαλούν ροπές κάθετες στην στροφορμή της Γης. Στην περίπτωση της γήινης κλόνησης όμως η γωνία φ (λόξωση της εκλειπτικής ε) δεν μεταβάλλεται ανάμεσα σε δυο σταθερές τιμές αλλά περισσότερο περίπλοκα, λόγω του συνδυασμού δυνάμεων που ασκούνται, λόγω του σχήματος της Γης που δεν είναι απόλυτα συμμετρικό, λόγω της εσωτερικής δομής της Γης και λόγω της ύπαρξης του ρευστού πυρήνα.

Το πεπλατυσμένο σχήμα της Γης και η κλίση του άξονα περιστροφής της ως προς το επίπεδο της εκλειπτικής δημιουργούν τις συνθήκες ώστε οι ελκτικές δυνάμεις του Ήλιου και της Σελήνης να προκαλούν την εμφάνιση μιας ροπής στη Γη που τείνει να στρέψει τον άξονά της ώστε να γίνει κάθετος στο επίπεδο της τροχιάς. Επειδή όμως η Γη περιστρέφεται, το αποτέλεσμα αυτής της ροπής είναι η μετάπτωση, η μετατόπιση δηλαδή του άξονα περιστροφής της Γης στο χώρο έτσι ώστε να διαγράφει μια κωνική επιφάνεια γύρω από τον άξονα της εκλειπτικής (σχήμα 5.5), όπως θα έκανε ο άξονας μιας οβούρας. Η κίνηση αυτή είναι πολύ αργή, με μια περίοδο περίπου 25800 ετών. Η κίνηση αυτή μπορεί να αναλυθεί σε δυο διαφορετικά φαινόμενα. Το πρώτο είναι μια ομαλή κυκλική κίνηση του άξονα περιστροφής γύρω από τον άξονα της εκλειπτικής (*μετάπτωση*) και σε μια ταλάντωση του αληθούς άξονα γύρω από το μέσο άξονα (*κλόνηση*). Η ταλάντωση αυτή είναι σύνθεση πολλών αρμονικών όρων, από τους οποίους ο κυριότερος έχει πλάτος 9.2 δευτερόλεπτα τόξου και περίοδο 18.6 χρόνια.

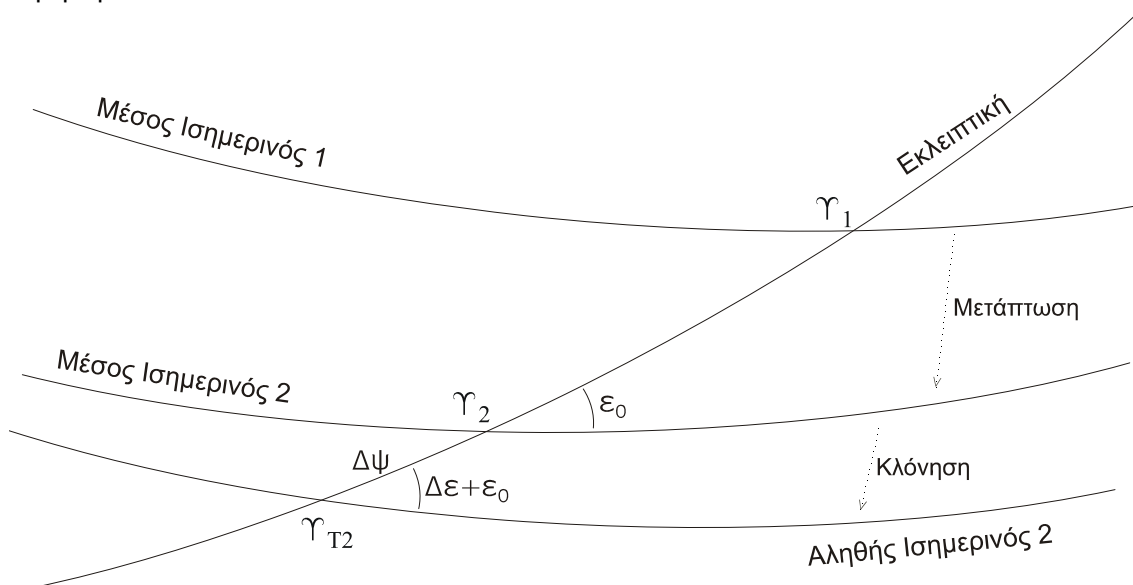
Πρέπει να σημειωθεί ότι η επίδραση της μετάπτωσης προσδιορίζεται από το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαφορετικών εποχών παρατήρησης, ενώ η επίδραση της κλόνησης υπολογίζεται από την τιμή των σχετικών όρων την στιγμή της παρατήρησης.

Η μαθηματική περιγραφή των φαινομένων αυτών και η διαδικασία υπολογισμού των επιδράσεών τους στις συντεταγμένες θα εξεταστεί στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.5

Επειδή το ουρανογραφικό σύστημα βασίζεται στην διεύθυνση του άξονα περιστροφής της Γης, είναι φανερό ότι επηρεάζεται από την μετάπτωση και την κλόνιση. Ειδικότερα, η κίνηση του Ισημερινού προκαλεί μια σύνθετη στροφή του συστήματος και μια μετακίνηση του σημείου Υ . Το σταθερό μέρος της κίνησης, που οφείλεται στην μετάπτωση, προσδιορίζει το **μέσο ισημερινό σημείο** Υ , που είναι η τομή του μέσου ισημερινού και της εκλειπτικής και μετακινείται περίπου 50.3 δευτερόλεπτα τόξου τον χρόνο κατά την ανάδρομη φορά. Όταν προστεθεί και το περιοδικό μέρος της κίνησης, που οφείλεται στην κλόνιση, προσδιορίζεται το **αληθινό ισημερινό σημείο** Υ_T , που είναι η τομή του αληθούς ισημερινού και της εκλειπτικής (σχήμα 5.6). Η διαφορά ανάμεσα στα σημεία Υ και Υ_T , εκφρασμένη σε μονάδες χρόνου, λέγεται *εξίσωση των ισημεριών* (*Equation of the equinox **Eq.E***). Κατά συνέπεια, διακρίνουμε **μέσο (mean)** και **αληθή (true)** αστρικό χρόνο, ανάλογα με το σημείο Υ που αναφερόμαστε.



Σχήμα 5.6

Αντίστοιχα, οι ουρανογραφικές συντεταγμένες διακρίνονται σε **μέσες συντεταγμένες**, αν αναφέρονται σ' ένα σύστημα που επηρεάζεται μόνο από την μετάπτωση, και σε **αληθείς συντεταγμένες**, αν αναφέρονται σε σύστημα που επηρεάζεται και από την κλόνηση.

5.5 Κίνηση του Πόλου

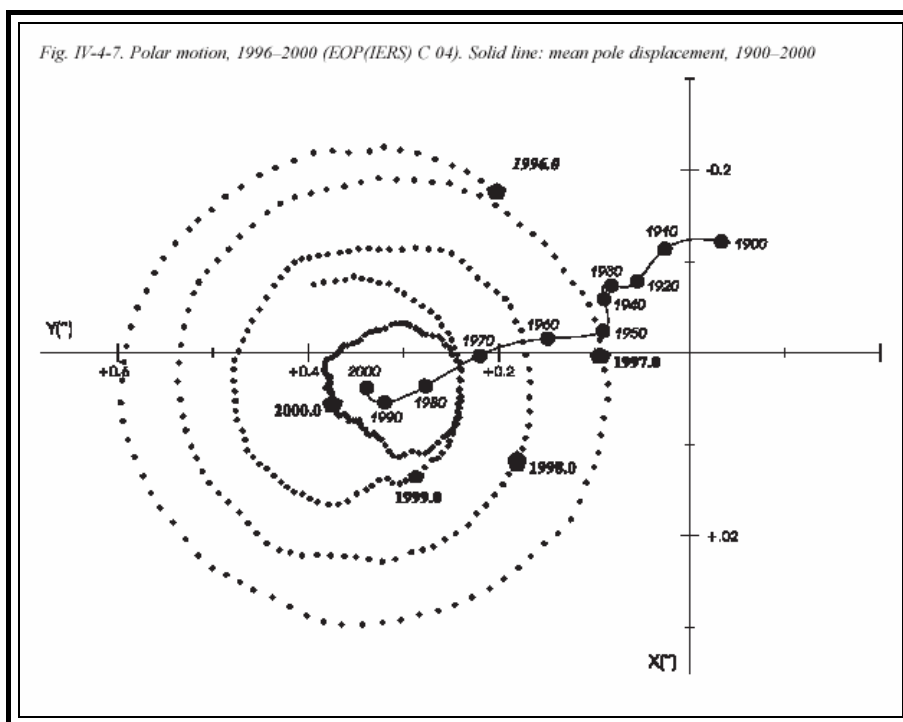
Η **κίνηση του πόλου (polar motion)** είναι η κίνηση του αληθούς ουράνιου πόλου (στιγμιαίου άξονα περιστροφής της Γης) ως προς ένα σημείο αναφοράς σταθερό στο φλοιό της Γης. Το σημείο αναφοράς συνήθως επιλέγεται να είναι κοντά στη μέση θέση του αληθούς πόλου. Οι απόλυτες γεωδαιτικές και οι αστρονομικές συντεταγμένες αναφέρονται στο σημείο αυτό, το οποίο καλείται Συμβατικός Πόλος. Η κίνηση του πόλου οφείλεται στις επιδράσεις των δυνάμεων που ασκούνται από τη Σελήνη και τον Ήλιο και σε γεωφυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, στους ωκεανούς και στο εσωτερικό της Γης.

Ο Chandler πρώτος έδειξε ότι η κίνηση αυτή αποτελείται από δύο βασικές συνιστώσες. Η μία είναι η περιστροφή του αληθούς πόλου γύρω από τον άξονα μέγιστης ροπής αδράνειας, κατά την ανάδρομη φορά όπως φαίνεται από τον Βορρά, με μια περίοδο περίπου 1.2 ετών και η άλλη είναι μια περιστροφή προς την ίδια διεύθυνση με μια ετήσια περίοδο. Σύμφωνα με το μοντέλο των Euler-Chandler, ο άξονας περιστροφής της Γης κινείται αφ' ενός σχεδόν κυκλικά (ελεύθερη ταλάντωση του Chandler με περίοδο 1.2 χρόνια) ως προς το κέντρο μάζας της Γης και αφ' ετέρου ελλειπτικά (εξαναγκασμένη ετήσια κίνηση). Ο Newcomb αναγνώρισε ότι η πρώτη κίνηση μπορούσε να εξηγηθεί από τις επιδράσεις της ελαστικής παραμόρφωσης της Γης και από την συνεπακόλουθη μετάθεση του άξονα μέγιστης ροπής αδράνειας. Η ακτίνα της κίνησης Chandler είναι περίπου 6 μέτρα.

Τα δεδομένα της Διεθνούς Υπηρεσίας Πλάτους (International Latitude Service – σήμερα IERS) αποκαλύπτουν μια μετάθεση του πόλου από τη μέση θέση του, με περίοδο που μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει τα 70 χρόνια (σχήμα 5.7). Αυτή η αιώνια κίνηση υποστηρίζεται ότι προκαλείται από τον συνδυασμό της μεταβολής του τανυστή αδράνειας και των τεκτονικών διαδικασιών.

Η κίνηση του πόλου προκαλεί μεταβολή στα γήινα πλάτη και μήκη που προσδιορίζονται άμεσα από αστρονομικές και δορυφορικές παρατηρήσεις. Αυτές οι μεταβολές πλατών έγιναν η αφορμή για την ανίχνευση της κίνησης του πόλου και από αυτές προσδιορίζεται, σε αρκετές περιπτώσεις, η κίνηση του πόλου.

Για την περιγραφή της κίνησης του πόλου ορίζεται το ακόλουθο δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς, με κέντρο την **Διεθνή Συμβατική Αφετηρία (Conventional International Origin)**, που ορίζεται ως η μέση θέση του πόλου περιστροφής κατά την περίοδο 1900-1905: ο άξονας x έχει τη διεύθυνση του μεσημβρινού του Greenwich και ο άξονας y σχηματίζει γωνία 90° προς τα ανατολικά του άξονα x (σχήμα 5.7). Η θέση του γήινου πλαισίου ως προς τον αληθή Ισημερινό και το αληθές Εαρινό Ισημερινό σημείο της εποχής καθορίζεται μέσω διαδοχικών στροφών x_p , y_p και του Αστρικού Χρόνου Greenwich. Οι συντεταγμένες x_p , y_p ανήκουν στις παραμέτρους προσανατολισμού της Γης.



Σχήμα 5.7

Ανακεφαλαίωση

- Οι διαταραχές στις βασικές κινήσεις της Γης επηρεάζουν τα συστήματα αναφοράς θέσεων και χρόνου.
- Ο ρυθμός περιστροφής της Γης δεν είναι σταθερός αλλά παρουσιάζει εποχιακές περιοδικές μεταβολές, μια αιώνια επιβράδυνση εξ αιτίας των παλιρροιών, καθώς και άλλες μικρότερες και ακανόνιστες μεταβολές
- Ο άξονας περιστροφής της Γης μεταβάλλει τον προσανατολισμό του στον χώρο, με συνέπεια μια συνεχή στροφή του ουρανογραφικού συστήματος. Το ομαλό μέρος της μεταβολής αυτής είναι η μετάπτωση (συνάρτηση χρονικού διαστήματος) ενώ το περιοδικό μέρος της μεταβολής είναι η κλόνιση (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.