

4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΧΡΟΝΟΥ

4.1 Γενικές έννοιες

Η υλοποίηση ενός συμβατικού πλαισίου αναφοράς για την διάσταση του χρόνου, το οποίο θα ονομάζεται κλίμακα χρόνου (time scale), απαιτεί την ίδια διαδικασία όπως η υλοποίηση ενός συστήματος αναφοράς για τον χώρο: επιλογή ιδεατού συστήματος, ορισμό, και υλοποίηση.

Ιδεατή κλίμακα χρόνου είναι μια κλίμακα χρόνου που χρησιμοποιεί μια σαφώς ορισμένη και σταθερή μονάδα μέτρησης. Επιπλέον, ακόμη και αν αυτή η συνθήκη πληρούται, θα πρέπει η εν λόγω κλίμακα χρόνου να μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα σημεία του χώρου, κάτι το οποίο είναι ασύμβατο με την Θεωρία της Σχετικότητας. Έτσι, η διαδικασία ορισμού και υλοποίησης των κλιμάκων χρόνου περιπλέκεται και απαιτεί μια σειρά από παραδοχές.

Ο απλούστερος τρόπος για να οριστεί μια κλίμακα χρόνου είναι να μελετηθεί ένα επαναλαμβανόμενο φαινόμενο και να ληφθεί η διάρκειά του ως μονάδα μέτρησης. Πρώτος ο Poincare σχολίασε σε σχέση με την μέτρηση του χρόνου: *“Όταν χρησιμοποιούμε το εκκρεμές για την μέτρηση του χρόνου υποθέτουμε: η διάρκεια δύο ίδιων φαινομένων είναι η ίδια ή ότι τα ίδια αίτια απαιτούν τον ίδιο χρόνο για να προκαλέσουν τα ίδια αποτελέσματα”*. Η εμπειρία μας δείχνει ότι *“περίπου όμοιες αιτίες απαιτούν σχεδόν τον ίδιο χρόνο για να προκαλέσουν περίπου τα ίδια αποτελέσματα”*.

Υπάρχουν δύο ορισμοί για την μέτρηση του χρόνου, ο χρόνος που προκύπτει από την επαναληψιμότητα τοπικών φαινομένων και ο χρόνος που προκύπτει από τη δυναμική του Νεύτωνα. Είναι όμως αυτές οι δύο προσεγγίσεις ισοδύναμες; Μέχρι την αρχή του 20ου αιώνα ήταν αποδεκτή η άποψη ότι οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε αναπαραστάσεις του ίδιου απόλυτου χρόνου. Όμως, σύμφωνα με τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, μόνο ο τοπικός χρόνος μπορεί να μετρηθεί άμεσα με ένα χρονόμετρο. Με άλλα λόγια το μέγεθος που μετριέται είναι ο *ιδιοχρόνος (proper time)* του χρονομέτρου ή του παρατηρητή. Από την άλλη πλευρά, το μέγεθος που κάνει τις εξισώσεις της κίνησης πιο απλές σε μια περιοχή του χώρου είναι μια συντεταγμένη χρόνου που επιλέγεται ακριβώς για την ιδιότητα της να απλοποιεί τις εξισώσεις και δεν έχει κανένα ιδιαίτερο φυσικό νόημα. Αυτό το μέγεθος λέγεται *συντεταγμένος χρόνος (coordinate time)*.

Επομένως, η μέτρηση του χρόνου έχει ως σκοπό τη δημιουργία αναπαραστάσεων :

- για την μονάδα ιδιοχρόνου που χρησιμοποιείται από οποιονδήποτε παρατηρητή για τα τοπικά πειράματα και παρατηρήσεις
- για τους διάφορους συντεταγμένους χρόνους που είναι χρήσιμοι στην μελέτη συμβάντων του χώρου.

Αφού υιοθετηθεί ένα δυναμικό μοντέλο που να είναι ικανοποιητικό, η μέτρηση του χρόνου μπορεί να βασιστεί είτε σε τοπικές μετρήσεις ιδιοχρόνου είτε σε πειραματικό προσδιορισμό ενός συντεταγμένου χρόνου.

Το επαναλαμβανόμενο φαινόμενο που λαμβάνεται ως πρότυπο πρέπει να ορίζεται με τέτοιο τρόπο που η διάρκειά του να θεωρείται ιδεατά σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να είμαστε σε θέση να καθορίσουμε τις ίδιες αιτίες ή αλλιώς ότι θα μπορούσαμε να ελαχιστοποιήσουμε οποιαδήποτε αιτία θα μπορούσε να προκαλέσει διαταραχή.

Το πρότυπο φαινόμενο, στην επαναληψιμότητα του οποίου βασίστηκαν οι πρώτες κλίμακες χρόνου, ήταν η περιστροφή της Γης. Στην συνέχεια, αφού διαπιστώθηκε ότι η περιστροφή της Γης δεν γίνεται με απολύτως σταθερή ταχύτητα, οι κλίμακες χρόνου βασίστηκαν στην συμπεριφορά ατόμων.

4.2 Αστρικός Χρόνος

Ο Αστρικός Χρόνος είναι μια άμεση μέτρηση της ημερήσιας περιστροφής της Γης. Ισες γωνίες στροφής ισοδυναμούν με ίσα διαστήματα Αστρικού Χρόνου, έτσι ώστε ο Αστρικός Χρόνος να αντανακλά την πραγματική περιστροφή της Γης και να μπορεί να προσδιοριστεί από παρατηρήσεις ουράνιων σωμάτων.

Ο προσδιορισμός του χρόνου από την παρατήρηση της καθημερινής περιστροφής της ουράνιας σφαίρας έχει αντιστοιχία με την ανάγνωση ενός κοινού ρολογιού. Η ουράνια σφαίρα αντιπροσωπεύει την πλάκα του ρολογιού, ενώ τα διάφορα άστρα αντιστοιχούν στις χαραγμένες υποδιαιρέσεις του κύκλου. Ο δείκτης του ρολογιού είναι ο αστρονομικός μεσημβρινός του τόπου, που αλλάζει συνεχώς θέση πάνω στην ουράνια σφαίρα καθώς παρασύρεται από την περιστροφή της Γης. Μπορεί κανείς να διαβάσει αυτό το ουράνιο ρολόι παρατηρώντας κάθε στιγμή ποια άστρα περνούν από τον μεσημβρινό. Το σύστημα του χρόνου που προσδιορίζεται με τον τρόπο αυτό είναι ο Αστρικός Χρόνος.

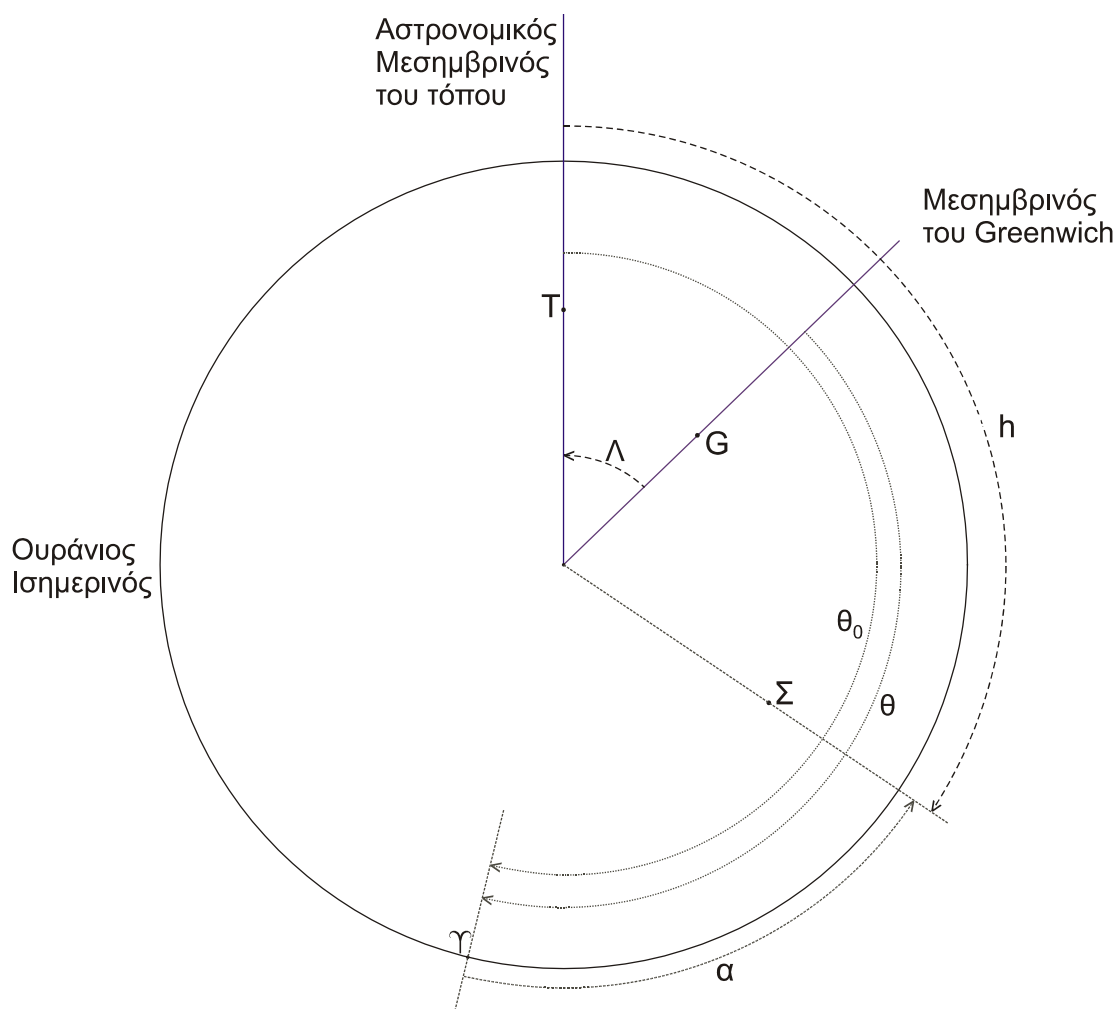
Ο *τοπικός αστρικός χρόνος* θ_0 (*Local Sidereal Time* LST) ορίζεται από το εαρινό ισημερινό σημείο Υ και τον αστρονομικό μεσημβρινό του τόπου. Κάθε στιγμή, η αριθμητική του τιμή είναι ίση με την ωριαία γωνία του σημείου Υ . Όταν η ωριαία γωνία του Υ αναφέρεται στον μεσημβρινό του Greenwich, ο χρόνος που προκύπτει λέγεται *αστρικός χρόνος Greenwich* θ (*Greenwich Sidereal Time* GST).

Η βασική μονάδα μέτρησης του αστρικού χρόνου είναι η *μέση αστρική ημέρα* (*Mean Sidereal Day*), που είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να αυξηθεί η τιμή του μέσου αστρικού χρόνου Greenwich κατά 24^h . Η αστρική ημέρα χωρίζεται σε 24 αστρικές ώρες, κάθε ώρα σε 60 λεπτά και κάθε λεπτό σε 60 δευτερόλεπτα. Η μέση αστρική ημέρα είναι περίπου 8msec μικρότερη από την διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής της Γης ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς εξ αιτίας της κίνησης του Υ στον Ισημερινό (λόγω της μετάπτωσης – βλέπε επόμενο κεφάλαιο).

Από τον ορισμό της ορθής αναφοράς ενός άστρου προκύπτει πως όταν ένα άστρο περνά από τον μεσημβρινό (άνω μεσουράνηση), εκείνη τη στιγμή η ωριαία γωνία του Υ είναι όση η ορθή αναφορά α του άστρου. Επομένως, μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε τον τοπικό αστρικό χρόνο παρατηρώντας τις μεσημβρινές διαβάσεις άστρων με γνωστή ορθή αναφορά.

Είναι όμως χρήσιμο να αναζητήσουμε την γενικότερη συσχέτιση του αστρικού χρόνου με την ωριαία γωνία ενός άστρου σε τυχαία θέση της τροχιάς του. Για τον σκοπό αυτό,

θα χρησιμοποιήσουμε την ορθή προβολή της ουράνιας σφαίρας στο επίπεδο του ουράνιου Ισημερινού, όπως στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1

Από το σχήμα 4.1 βλέπουμε πως όταν ένα άστρο Σ (που έχει ορθή αναφορά α) μεσουρανή στον μεσημβρινό του Greenwich, στον τόπο παρατήρησης T έχει ωριαία γωνία ίση με το μήκος Λ του τόπου. Γενικότερα, επομένως, όταν στο Greenwich η ωριαία γωνία του άστρου είναι h_G , την ίδια στιγμή στον τόπο T η ωριαία γωνία του άστρου είναι $h = h_G + \Lambda$. Αν, αντί ενός άστρου, αναφερθούμε στο σημείο Υ , προκύπτει πως ο τοπικός αστρικός χρόνος θ_0 είναι ίσος με $\theta + \Lambda$, όπου θ ο αστρικός χρόνος Greenwich. Από το ίδιο σχήμα είναι προφανές ότι, σε οποιοδήποτε τόπο, ένα άστρο έχει ωριαία γωνία $h = \theta_0 - \alpha$. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω, προκύπτει η γενική σχέση:

$$h = \theta + \Lambda - \alpha$$

Αρχικά ο Αστρικός Χρόνος προσδιοριζόταν από παρατηρήσεις μεσουράνησης ουράνιων σωμάτων. Παρατηρήσεις της ημερήσιας κίνησης των άστρων παρέχουν μια άμεση μέτρηση του Αστρικού Χρόνου, αφού οι ορθές αναφορές μετρώνται από το σημείο Υ . Η αναγωγή αυτών των παρατηρήσεων βασιζόταν στην ωριαία γωνία του σημείου μηδεν της ορθής αναφοράς του καταλόγου των άστρων. Σήμερα ο Αστρικός

Χρόνος προσδιορίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια από παρατηρήσεις VLBI. Μπορεί επίσης να προσδιοριστεί με μετρήσεις LLR και SLR.

4.3 Παγκόσμιος Χρόνος

Παρόλο που ο αστρικός χρόνος μπορεί να προσδιοριστεί γρήγορα και με αρκετή ακρίβεια, υπάρχει η πρακτική αναγκαιότητα για ένα σύστημα χρόνου που να συμβαδίζει με την εναλλαγή ημέρας και νύχτας, να συμφωνεί δηλαδή με την καθημερινή κίνηση του Ήλιου. Έτσι καθιερώθηκε ο **Παγκόσμιος Χρόνος (Universal Time)** που ιστορικά βασίστηκε στη μέση κίνηση του Ήλιου αλλά σήμερα ορίζεται από τον αστρικό χρόνο, που προσδιορίζεται από παρατηρήσεις.

Ο Παγκόσμιος Χρόνος συνδέεται απευθείας με τον (μέσο) Αστρικό Χρόνο Greenwich θ μέσω μιας συμβατικής μαθηματικής σχέσης. Η σχέση αυτή (από την 1^η Ιανουαρίου 1984) είναι η ακόλουθη :

$$\theta = 18^h 41^m 50^s .54841 + 86636^s .5553679051 d + 6^s .9789147 \cdot 10^{-11} d^2 - 1^s .272 \cdot 10^{-19} d^3$$

όπου d είναι το διάστημα σε μέρες από τις 12^h UT1 της 1^{ης} Ιανουαρίου 2000.

Αν υπολογίσουμε πόσο μεταβάλλεται ο μέσος αστρικός χρόνος Greenwich θ για δύο τιμές του d που να διαφέρουν ακριβώς μια ακέραια μονάδα, το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να αυξηθεί ο θ κατά το ποσό αυτό λέγεται **μέση ηλιακή ημέρα (mean solar day)** και χωρίζεται σε 24 ηλιακές ώρες, κάθε ώρα σε 60 ηλιακά λεπτά και κάθε λεπτό σε 60 ηλιακά δευτερόλεπτα. Με άλλα λόγια, η μέση ηλιακή ημέρα (που έχει 86400 ηλιακά δευτερόλεπτα) είναι το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές στιγμές 0^h UT1, όπως υπολογίζονται από τον παραπάνω τύπο.

Στην κλίμακα του Παγκόσμιου χρόνου αναφέρονται και οι συμβατικές ημερομηνίες. Κάθε ημερολογιακή ημέρα αρχίζει τα μεσάνυχτα (0^h UT1) και τελειώνει τα επόμενα μεσάνυχτα (24^h UT1). Επειδή ο προσδιορισμός χρονικών διαστημάτων με το συμβατικό ημερολόγιο δεν είναι καθόλου πρακτικός στους υπολογισμούς, έχει καθιερωθεί ένα σύστημα συνεχούς αρίθμησης των ημερών, από μεσημέρι σε μεσημέρι, αρχίζοντας από μια μακρινή ημερομηνία στο παρελθόν. Ο “αύξων αριθμός” κάθε ημέρας στο σύστημα αυτό λέγεται **Αριθμός Ιουλιανής Ημέρας** ή **Ιουλιανή Ημερομηνία (Julian Day Number** ή **Julian Date)** και είχε την τιμή 1 το μεσημέρι (12^h UT) της 1^{ης} Ιανουαρίου του 4713 π.Χ. Ο προσδιορισμός του αριθμού Ιουλιανής ημέρας γίνεται με ειδικούς αλγορίθμους (βλέπε «Αστρονομικούς Πίνακες»). Η Ιουλιανή ημερομηνία μετριέται από το μεσημέρι κάθε μέρας, επομένως έχει δεκαδικό μέρος ίσο με $0.5 + UT/24^h$. Για παράδειγμα, η Ιουλιανή ημερομηνία στις 18^h UT της 21^{ης} Μαρτίου 2006 είναι: JD 2453816.25000

Για να αποφύγουμε τη χρήση πολύ μεγάλων αριθμών χρησιμοποιούμε ακόμα και την **Τροποποιημένη Ιουλιανή ημερομηνία (Modified Julian Date)** που είναι:

$$MJD = JD - 2400000.5$$

Σε οποιαδήποτε στιγμή, ο Παγκόσμιος Χρόνος μπορεί να προσδιοριστεί από παρατηρήσεις της ημερήσιας κίνησης των άστρων. Αυτή η αρχική και ανεπεξέργαστη κλίμακα μέτρησης χρόνου, η οποία εξαρτάται από την θέση παρατήρησης, ονομάζεται UT0. Εάν αυτή η αρχική κλίμακα διορθωθεί για την κίνηση του πόλου προκύπτει ο

χρόνος UT1, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από την περιοχική παρατήρησης αλλά επηρεάζεται από την μεταβαλλόμενη περιστροφή της Γης.

Η παραπάνω σχέση, που συνδέει τον Αστρικό με τον Παγκόσμιο Χρόνο, ιστορικά θεωρείτο ως ορισμός του Παγκόσμιου Χρόνου διότι, όταν δημιουργήθηκε, ο καλύτερος τρόπος για τον υπολογισμό του UT1 ήταν οι παρατηρήσεις άστρων.

Σύμφωνα με το σύγχρονο ορισμό, ο χρόνος UT1 πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις :

1. να είναι ανάλογος της γωνίας περιστροφής της Γης γύρω από την αληθή θέση του άξονα περιστροφής,
2. ο ρυθμός του UT1 επιλέγεται έτσι ώστε η διάρκεια μιας ημέρας UT1 να προσεγγίζει όσο το δυνατό περισσότερο τη διάρκεια της μέσης ηλιακής μέρας,
3. η φάση του UT1 επιλέγεται έτσι ώστε η στιγμή 12^h UT1 να αντιστοιχεί περίπου στη στιγμή που ο Ήλιος μεσουρανήει στο μεσημβρινό του Greenwich.

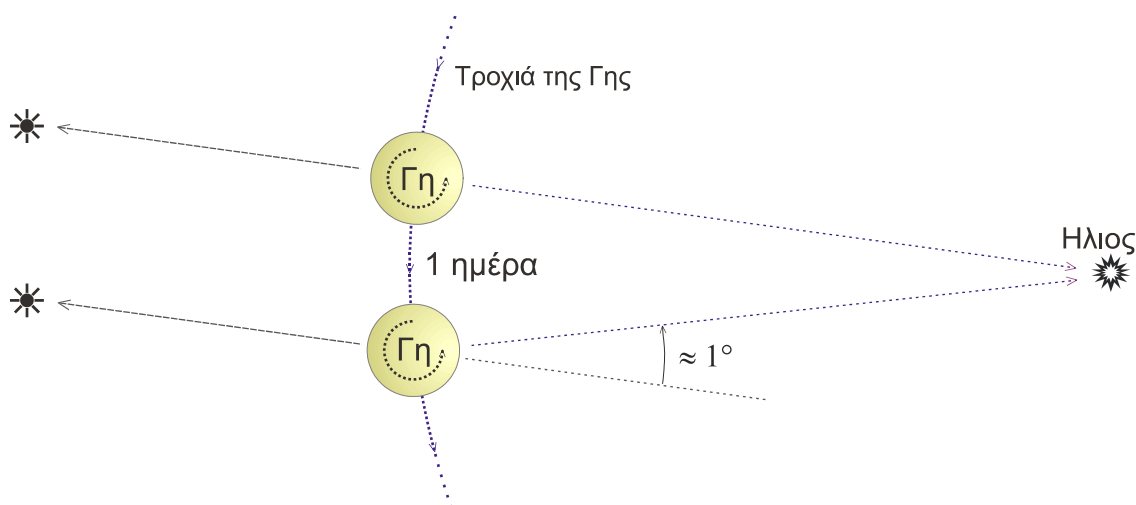
Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα επιβεβαιώθηκε η μη ομαλή περιστροφή της Γης και γι' αυτό εγκαταλείφθηκε ο ορισμός του δευτερολέπτου ως το 1/86400 της μέσης ηλιακής μέρας. Τόσο ο Αστρικός όσο και ο Παγκόσμιος Χρόνος UT1 επηρεάζονται από την ασταθή περιστροφή της Γης, γι' αυτό και τα μήκη των αστρικών και των δευτερολέπτων UT1 δεν είναι σταθερά όταν εκφράζονται σε μια ομοιόμορφη κλίμακα χρόνου.

Από τον τύπο ορισμού του Παγκόσμιου Χρόνου προκύπτει ότι η μέση ηλιακή ημέρα περιέχει 86636.5553679051 αστρικά δευτερόλεπτα (παραβλέποντας όρους ανώτερης τάξης), επομένως ο λόγος της μέσης ηλιακής προς τη μέση αστρική ημέρα είναι ίσος με

$$f = \frac{86636.5553679051}{86400} \approx 1.00273790935075$$

Μπορούμε λοιπόν να εκφράσουμε διαστήματα Παγκόσμιου Χρόνου στα αντίστοιχα του Αστρικού Χρόνου πολλαπλασιάζοντας με το λόγο αυτό και αντίστροφα.

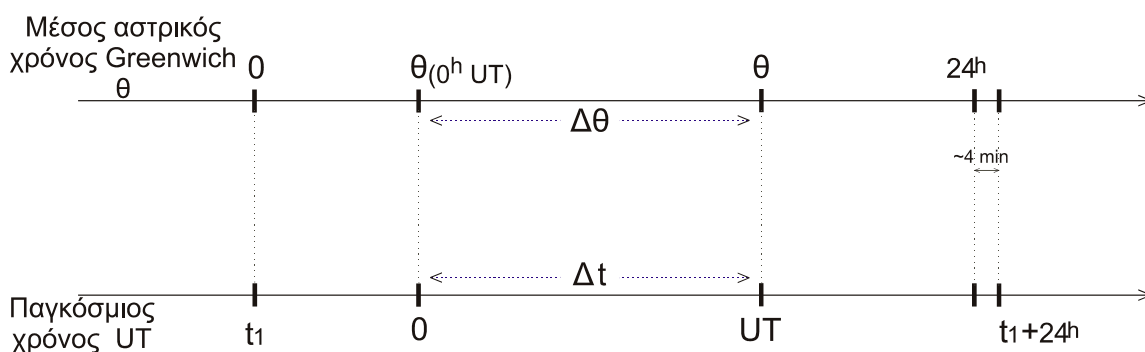
Επειδή η αστρική ημέρα έχει 86400 αστρικά δευτερόλεπτα, τα επιπλέον 236.555... δευτερόλεπτα που χρειάζονται για να συμπληρωθεί μια ηλιακή ημέρα οφείλονται στον συνδυασμό περιστροφής και περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2

Στην διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής (αστρική ημέρα) η Γη έχει μετακινηθεί στην τροχιά της κατά μια περίπου μοίρα. Για να συμπληρώσει λοιπόν μια πλήρη περιστροφή ως προς τον Ήλιο (ηλιακή ημέρα) πρέπει να περιστραφεί σχεδόν μια μοίρα ακόμη, για την οποία χρειάζεται περίπου 4 λεπτά.

Η μετατροπή των ενδείξεων των δύο κλιμάκων χρόνου γίνεται εύκολα, με την βοήθεια του λόγου f των μονάδων μέτρησης και της αντιστοιχίας σε κάποια γνωστή χρονική στιγμή, όπως είναι η στιγμή 0^h UT κάθε μέρας.



Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, η χρονική στιγμή UT Παγκόσμιου Χρόνου και η αντίστοιχη στιγμή θ μέσου αστρικού χρόνου Greenwich συνδέονται με την σχέση:

$$\theta = \theta_{0^h \text{ UT}} + \text{UT} \cdot f$$

Με την σχέση αυτή μπορεί να γίνει μετατροπή Παγκόσμιου χρόνου σε αστρικό και αντίστροφα.

4.4 Κλίμακες ομοιόμορφου χρόνου

Όταν επιβεβαιώθηκε η μη ομαλή περιστροφή της Γης, προέκυψε η ανάγκη ορισμού κλιμάκων χρόνου που να είναι ανεξάρτητες από την περιστροφή της Γης και να έχουν σταθερό μέτρο.

Ως μονάδα των κλιμάκων χρόνου σταθερού μέτρου χρησιμοποιείται το δευτερόλεπτο του συστήματος SI, το οποίο σήμερα ορίζεται ως ακολούθως:

Το δευτερόλεπτο ορίζεται ως η διάρκεια 9192631770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην μετάπτωση μεταξύ των δύο επιπέδων υπέρλειπτης υψής της βασικής στάθμης του ατόμου του καισίου 133.

Από τη στιγμή που ο ορισμός αναφέρεται σε ένα παρατηρήσιμο φαινόμενο, μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε σύστημα αναφοράς. Έτσι κλίμακες χρόνου που βασίζονται στο δευτερόλεπτο του SI μπορούν να υλοποιηθούν στην επιφάνεια της Γης ή σε άλλα ουράνια σώματα, σε διαστημόπλοια ή σε θεωρητικού ενδιαφέροντος μέρη, όπως το βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος.

4.5 Ατομικός Χρόνος

Ο Διεθνής **Ατομικός Χρόνος (Temps Atomique International)** είναι μια πρακτική κλίμακα χρόνου που βασίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα στον ορισμό του δευτερολέπτου SI. Εκπληρώνει τις απαιτήσεις σε ακρίβεια, μακροπρόθεσμη σταθερότητα και αξιοπιστία. Το δευτερόλεπτο SI και ο TAI χρησιμοποιούνται ως βάση για παρεμβολή και πρόβλεψη σε άλλες κλίμακες χρόνου.

Ο TAI είναι μία συντονισμένη κλίμακα χρόνου που έχει ως μονάδα της το δευτερόλεπτο SI στο γεωειδές. Ο όρος «συντονισμένη κλίμακα» σημαίνει μια κλίμακα χρόνου κατασκευασμένη από ένα κατάλληλο συνδυασμό πολλών κλιμάκων χρόνου, που υλοποιούνται από διάφορες συσκευές. Ο TAI προκύπτει από την ανάγνωση πολλών ατομικών χρονομέτρων, κατανεμημένων σε όλη τη Γη, μέσω μιας συγκεκριμένης στατιστικής διαδικασίας, αφού αφαιρεθούν οι συστηματικές διαφορές αναμεσά τους. Ακριβέστερα, ο υπολογισμός του TAI γίνεται συνδυάζοντας δεδομένα από όλα τα χρονόμετρα ακριβείας (πρότυπα χρονόμετρα καισίου ή MASER Υδρογόνου) που συμμετέχουν στην υλοποίησή του. Η διαθεσιμότητα, η αξιοπιστία και η βραχυπρόθεσμη σταθερότητα του TAI εξασφαλίζονται από έναν μεγάλο αριθμό εμπορικών χρονομέτρων, ενώ η ακρίβεια και η μακροπρόθεσμη σταθερότητα παρέχονται από εργαστηριακά χρονόμετρα καισίου και MASER Υδρογόνου.

Ο χρόνος TAI μπορεί να επεκταθεί σε οποιοδήποτε σταθερό ή κινούμενο σημείο κοντά στο γεωειδές εφαρμόζοντας τις διορθώσεις της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας (διορθώσεις για τις διαφορές στο βαρυτικό δυναμικό, για την ταχύτητα και για την περιστροφή της Γης).

4.6 Συντονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος

Από την 1^η Ιανουαρίου 1972 τέθηκε σε ισχύ ο **Συντονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος (Universal Time Coordinated)**, ο οποίος διαφέρει από τον TAI κατά ένα ακέραιο αριθμό δευτερολέπτων. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος UTC πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις :

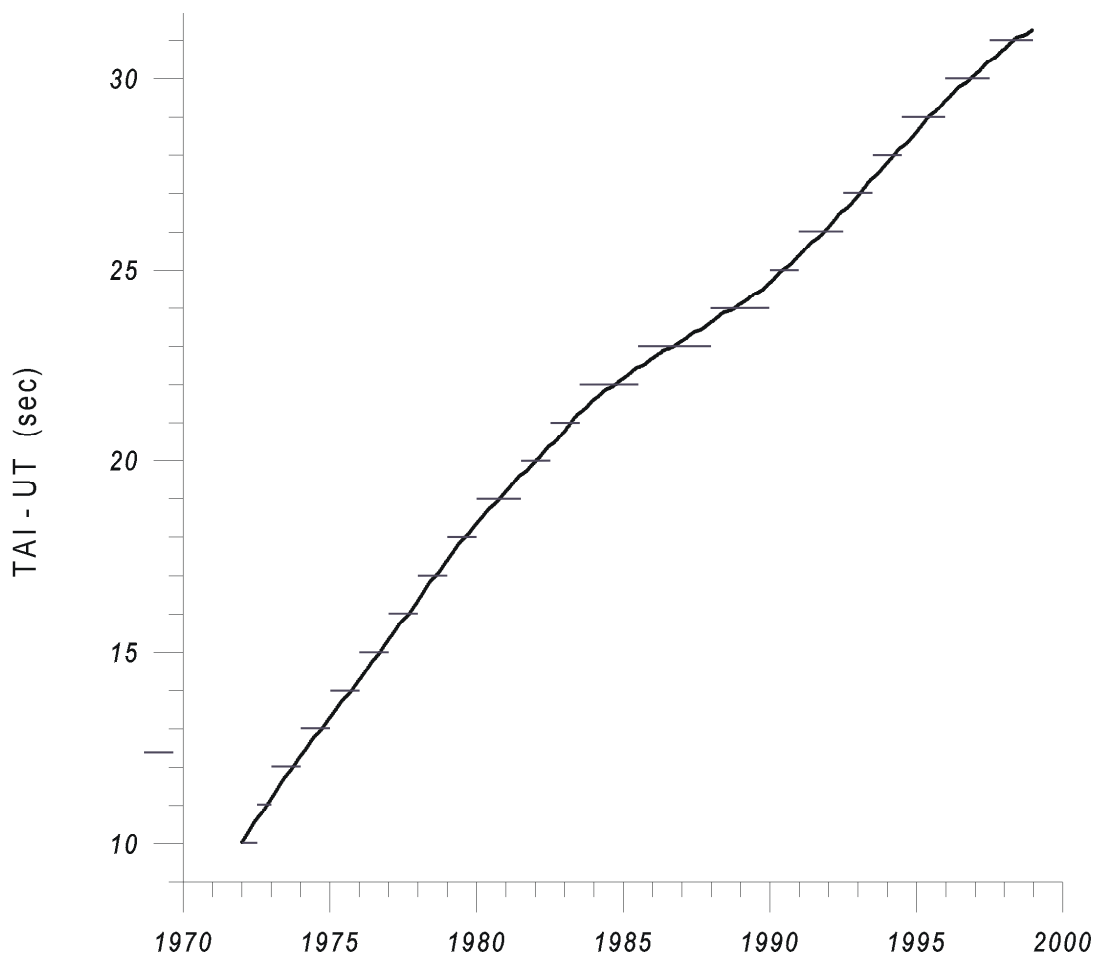
$$|TAI - UTC| = n \text{ sec} , \quad \text{όπου } n \text{ ακέραιος αριθμός} \quad \text{και} \quad |UT1 - UTC| \leq 0.9 \text{ sec}$$

Ο χρόνος UTC υπολογίζεται από τον Ατομικό Χρόνο TAI μέσω της σχέσης :

$$UTC = TAI - (10 + \text{εμβόλιμα δευτερόλεπτα})$$

Εξαιτίας της αιώνιας επιβράδυνσης της περιστροφής της Γης, η κλίμακα UTC συντηρείται με την εισαγωγή ενός ακέραιου *εμβόλιμου δευτερολέπτου (leap second)* όποτε απαιτείται. Επιφορτισμένη με την απόφαση για την εισαγωγή εμβόλιμων δευτερολέπτων και την ανακοίνωσή τους είναι η Διεθνής Υπηρεσία για την Περιστροφή της Γης (**International Earth Rotation Service**).

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η πορεία της διαφοράς TAI – UT1, καθώς και η πορεία του UTC, για το χρονικό διάστημα 1972 – 2000.



Σχήμα 4.3

Η ακριβής τιμή της διαφοράς UT1 - UTC βρίσκεται με ανάλυση διαφόρων παρατηρήσεων και δημοσιεύεται στο ειδικό δελτίο (Bulletin A) του IERS. Μια προσεγγιστική τιμή της διαφοράς, που συμβολίζεται με DUT και έχει ακρίβεια δύο εκατοστών του δευτερολέπτου, εκπέμπεται κωδικοποιημένη στα σήματα των ειδικών ραδιοσταθμών που διανέμουν το χρόνο UTC. Τα σήματα αυτά εξυπηρετούν τον συγχρονισμό των χρονομέτρων για τις διάφορες παρατηρήσεις. Όπου απαιτείται ακρίβεια χρόνου καλύτερη από δέκατο του δευτερολέπτου, χρησιμοποιούνται τα σήματα χρόνου των δορυφόρων του Global Positioning System (GPS), οι οποίοι διαθέτουν ατομικά ρολόγια και υλοποιούν την κλίμακα του **GPS time**, που έχει σταθερή διαφορά από τον ατομικό χρόνο TAI ακριβώς 19sec. Με την βοήθεια του GPS μπορεί να επιτευχθεί σήμερα ακρίβεια συγχρονισμού καλύτερη από 1 μsec (10^{-6} sec).

Ο Συντονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος UTC συμβαδίζει με τον παραδοσιακό ηλιακό χρόνο στον μεσημβρινό του Greenwich. Για να διατηρηθεί αυτή η συμφωνία και σε άλλα μέρη, η Γη έχει χωριστεί σε 24 ζώνες, με πλάτος 15° γεωγραφικού μήκους η κάθε μια, και σε κάθε ζώνη ισχύει ο **Πολιτικός Χρόνος** ή **Χρόνος ζώνης (Zone Time)** που διαφέρει από τον UTC ένα ακέραιο αριθμό ωρών. Για παράδειγμα, η Ελλάδα έχει Χρόνο Ζώνης UTC+ 2^h, ενώ η θερινή ώρα Ελλάδας είναι UTC+ 3^h.

4.7 Σχετικιστικές κλίμακες χρόνου

Η μέτρηση του χρόνου είναι η πιο ακριβής μέτρηση που μπορούμε να κάνουμε σήμερα. Στους ορισμούς κλιμάκων χρόνου πρέπει να εισαχθούν έννοιες της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας γιατί το σφάλμα του καλύτερου χρονομέτρου σήμερα είναι μικρότερο από το μέγεθος των κύριων διορθωτικών όρων της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας.

Στη νευτώνεια μηχανική ο χρόνος είναι απόλυτος. Θεωρείται μοναδικός και ομοιόμορφος παντού, ενώ το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο γεγονότων θεωρείται σταθερό σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς και αν χρησιμοποιείται για τη μέτρηση.

Στη Γενική Σχετικότητα ο χώρος και ο χρόνος αποτελούν μια γεωμετρική οντότητα και δεν μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους. Ακόμη η παρουσία μαζών επηρεάζει το χωροχρόνο και οδηγεί σε προβλήματα στον ορισμό συστημάτων χρόνου. Το βαρυτικό πεδίο ή η σχετική κίνηση μεταξύ ενός ζεύγους χρονομέτρων που βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες προκαλεί μια διαφορά στις αναγνώσεις τους.

Ο *ιδιοχρόνος* του παρατηρητή είναι ο τοπικός χρόνος ο οποίος μπορεί να μετρηθεί άμεσα με ένα χρονόμετρο. Από την άλλη πλευρά, ο *συντεταγμένος χρόνος* είναι ένα μέγεθος που κάνει τις εξισώσεις της κίνησης πιο απλές σε μια περιοχή του χώρου και δεν έχει κανένα φυσικό νόημα.

Η έννοια του ιδιοχρόνου είναι τοπική, επομένως μπορούν να οριστούν τόσο ιδιοχρόνοι όσοι και χρονόμετρα και κανένας από αυτούς δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο πλεονέκτημα. Όμως δεν μπορούμε να συγκρίνουμε άμεσα δύο διαφορετικούς ιδιοχρόνους διότι δεν υπάρχει κοινή περιοχή στην οποία να ισχύουν και οι δύο.

Η ιδέα του συντεταγμένου χρόνου προέρχεται από τη θεώρηση του χρόνου ως σχετιζόμενου με μια από τις τέσσερις συντεταγμένες που περιγράφουν τον χωροχρόνο. Έτσι υπάρχουν τόσοι συντεταγμένοι χρόνοι όσοι και συστήματα συντεταγμένων.

Όπως ένα σύστημα συντεταγμένων είναι ένα εργαλείο φτιαγμένο από τον άνθρωπο με σκοπό την περιγραφή του χώρου γύρω του, έτσι και ο συντεταγμένος χρόνος, ως μέρος του συστήματος συντεταγμένων, είναι επίσης ένα εργαλείο και δεν έχει φυσική υπόσταση.

Συνήθως ο συντεταγμένος χρόνος ορίζεται ως ο ιδιοχρόνος ενός πρότυπου χρονομέτρου που ηρεμεί στην αφετηρία του συστήματος συντεταγμένων. Για παράδειγμα, ο συντεταγμένος χρόνος ενός γεωκεντρικού συστήματος συντεταγμένων ορίζεται ως ο ιδιοχρόνος ενός χρονομέτρου που ηρεμεί στο γεώκεντρο, όταν αγνοείται η βαρυτική επίδραση της Γης.

Η παγκόσμια χρήση ενός υλοποιήσιμου γεωκεντρικού συντεταγμένου χρόνου που βασίζεται στον ορισμό του δευτερολέπτου του ιδιοχρόνου και επίσης η υιοθέτηση ενός κοινώς αποδεκτού τανυστή είναι χρήσιμη γιατί:

- Παρέχει μια βάση για συγχρονισμό των χρονομέτρων που βρίσκονται στη Γη και στο κοντινό της περιβάλλον,
- Παρέχει τον συντεταγμένο χρόνο που, όταν σχετίζεται με τις κατάλληλες χωρικές συντεταγμένες, επιτρέπει την περιγραφή των τροχιακών κινήσεων.

- Μέσω ενός τετραδιάστατου μετασχηματισμού παρέχει μια πρακτική υλοποίηση άλλων συντεταγμένων χρόνων, όπως του βαρυκεντρικού συντεταγμένου χρόνου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τροχιών των πλανητών,
- Μέσω των κατάλληλων μετασχηματισμών παρέχει τον τοπικό ιδιοχρόνο και το δευτερόλεπτο SI (ιδιο-δευτερόλεπτο) που πρέπει να χρησιμοποιούνται για τοπικές μετρήσεις.

4.8 Δυναμικός χρόνος

Ο Δυναμικός Χρόνος (Dynamical Time) αντιπροσωπεύει την ανεξάρτητη μεταβλητή στις εξισώσεις κίνησης των σωμάτων του ηλιακού συστήματος. Σύμφωνα με την Θεωρία της Σχετικότητας, αυτή η ανεξάρτητη μεταβλητή εξαρτάται από το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται. Στη σύγχρονη πρακτική, οι εξισώσεις κίνησης συχνά αναφέρονται στο βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος.

Η ανεξάρτητη μεταβλητή μιας γεωκεντρικής εφημερίδας είναι ο γήινος δυναμικός χρόνος. Για μια δοσμένη σχετικιστική θεωρία υπάρχει ένας μετασχηματισμός μεταξύ της βαρυκεντρικής και της γήινης δυναμικής κλίμακας χρόνου. Οι αυθαίρετες σταθερές του μετασχηματισμού μπορούν να επιλεγθούν έτσι ώστε οι κλίμακες χρόνου να έχουν μόνο περιοδικές μεταβολές η μία ως προς την άλλη.

Από τη στιγμή που ο μετασχηματισμός μεταξύ των βαρυκεντρικών και των γεωκεντρικών κλιμάκων χρόνου εξαρτώνται από τη θεωρία, οι δύο τύποι κλιμάκων δεν είναι δυνατόν να είναι μοναδικοί. Έτσι, επιλέχθηκε μια μοναδική δυναμική κλίμακα χρόνου για τις γεωκεντρικές εφημερίδες, ενώ οι δυναμικές κλίμακες χρόνου για τις βαρυκεντρικές εφημερίδες εξαρτώνται από τη θεωρία.

Ο **Χρόνος Εφημερίδων (Ephemeris Time)** αποτέλεσε την πρώτη υλοποίηση δυναμικού χρόνου βασισμένου στην τροχιακή κίνηση της Γης. Ο χρόνος ET ορίζεται από την υιοθέτηση μιας εφημερίδας του Ήλιου στο συμβατικό σύστημα αναφοράς που ορίζεται από την εκλειπτική και το μέσο Εαρινό Ισημερινό σημείο.

Ο Δυναμικός Χρόνος ορίστηκε το 1976 σύμφωνα με τις ακόλουθες αρχές :

1. Τη χρονική στιγμή $00^h00^m00^s TAI$ της 1^{ης} Ιανουαρίου 1977, η τιμή της νέας κλίμακας χρόνου για τη γεωκεντρική εφημερίδα (**Γεωκεντρικός Δυναμικός Χρόνος – Terrestrial Dynamical Time**) θα είναι $01^d00^h00^m32^s.184$ ακριβώς.
2. Η μονάδα αυτής της κλίμακας χρόνου θα είναι η ημέρα των 86400 δευτερολέπτων SI, όπως αυτά μετρώνται στην μέση στάθμη της θάλασσας.
3. Οι κλίμακες χρόνου που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις κίνησης που αναφέρονται στο βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος και η κλίμακα χρόνου της γεωκεντρικής εφημερίδας πρέπει να έχουν μόνο περιοδικές μεταβολές μεταξύ τους.

Ο **Βαρυκεντρικός Δυναμικός Χρόνος (Barycentric Dynamical Time TDB)** είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή των εξισώσεων κίνησης που αναφέρονται στο βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος. Στην πράξη ο TDB προσδιορίζεται από τον TDT μέσω μιας

μαθηματικής σχέσης. Αυτή η σχέση εξαρτάται από τις σταθερές, τις θέσεις και τις κινήσεις των σωμάτων του ηλιακού συστήματος και την βαρυτική θεωρία. Η προσεγγιστική σχέση που συνήθως χρησιμοποιείται για τον μετασχηματισμό από τον TDT στον TDB είναι:

$$TDB = TDT + 0^s.001658 \sin g + 0^s.000014 \sin 2g$$

όπου $g = 357.53 + 0.9856003(JD - 2451545.0)$

Το 1991, όταν ορίστηκαν το βαρυκεντρικό και το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, ορίστηκαν επίσης ο Βαρυκεντρικός Συντεταγμένος Χρόνος (Barycentric Coordinate Time) και ο Γεωκεντρικός Συντεταγμένος Χρόνος (Geocentric Coordinate Time) για να χρησιμοποιούνται με τα αντίστοιχα συστήματα, με σκοπό να αντικαταστήσουν τις κλίμακες TDT και TDB.

Οι χωροχρονικές συντεταγμένες ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε :

1. το βαρυκεντρικό και το γεωκεντρικό σύστημα να μην περιστρέφονται ως προς μακρινά εξωγαλαξιακά αντικείμενα.
2. Ο συντεταγμένος χρόνος να προκύπτει από κλίμακα χρόνου που υλοποιείται μέσω ατομικών χρονομέτρων που λειτουργούν στη Γη.
3. Οι βασικές μονάδες μέτρησης του χωροχρόνου σε όλα τα συστήματα είναι το δευτερόλεπτο του συστήματος SI για τον ιδιοχρόνο και το μέτρο του SI για το ίδιο μήκος.
4. Οι συντεταγμένοι χρόνοι BCG και TCG έχουν τιμή $00^h00^m32^s.184$ ακριβώς, στις $00^h00^m00^s TAI$ την 1^η Ιανουαρίου 1977, στο γεώκεντρο.

4.9 Γήινος Χρόνος

Η κλίμακα χρόνου που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις κίνησης ως προς το βαρυκεντρο του ηλιακού συστήματος πρέπει να είναι τέτοια, ώστε μεταξύ αυτής της κλίμακας και της κλίμακας των γεωκεντρικών εφημερίδων να υπάρχουν μόνο περιοδικές μεταβολές. Όπως είδαμε, το 1979 στις προαναφερόμενες κλίμακες χρόνου δόθηκαν τα ονόματα Γήινος Δυναμικός Χρόνος TDT και Βαρυκεντρικός Δυναμικός Χρόνος TDB. Με βάση τους ορισμούς τους, η μονάδα του TDT είναι η ημέρα των 86400 SI δευτερολέπτων και συνεπώς ο TDT είναι μια ιδεατή μορφή του Ατομικού Χρόνου που καμία σχέση δεν έχει με τις δυναμικές θεωρίες. Έτσι, το επίθετο «δυναμικός» στην ονομασία του TDT είναι παραπλανητικό, διότι υπονοεί ότι ο χρόνος δίνεται από τη δυναμική θεωρία. Σε μια προσπάθεια να αποφευχθούν οι ασάφειες, προτάθηκε να δοθεί στον χρόνο TDT το όνομα **Γήινος Χρόνος (Terrestrial Time)** και στον χρόνο TDB το όνομα TB.

Ο Γήινος Χρόνος TT ορίζεται τώρα ως εξής:

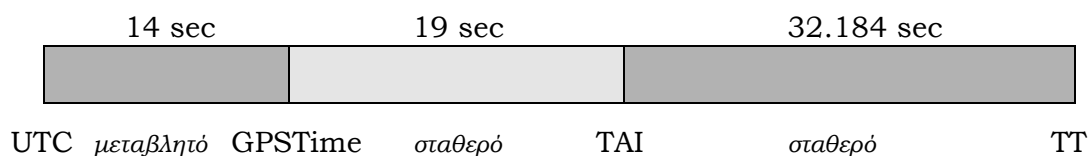
1. ο χρόνος TT είναι ο χρόνος που χρησιμοποιείται στις γεωκεντρικές εφημερίδες.
2. Ο χρόνος TT διαφέρει από τον χρόνο TCG κατά ένα σταθερό ρυθμό, ενώ η μονάδα μέτρησής του είναι το δευτερόλεπτο του SI, όπως αυτό μετράται στο γεωειδές.

3. Ο χρόνος TT είχε την τιμή $00^h00^m32^s.184$ στις $00^h00^m00^s TAI$ της 1^{ης} Ιανουαρίου 1977.

Σύμφωνα με τον αρχικό ορισμό του TT υπάρχει μια διαφορά μεταξύ του TT και του TAI ίση με 32.184 δευτερόλεπτα:

$$TT = TAI + 32.184s$$

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η αλληλουχία και η διαφορά των κλιμάκων ομοιόμορφου χρόνου, όπως ίσχυε την 1η Ιανουαρίου 2006.



Ανακεφαλαίωση

- Η ημερήσια περιστροφή της Γης ορίζει την κλίμακα του αστρικού χρόνου. Η μονάδα της κλίμακας αυτής είναι η μέση αστρική ημέρα και περιέχει 86400 αστρικά δευτερόλεπτα.
- Ισοδύναμη κλίμακα χρόνου είναι ο Παγκόσμιος Χρόνος. Η μονάδα του UT είναι η μέση ηλιακή μέρα, που έχει 86400 ηλιακά δευτερόλεπτα αλλά ισοδυναμεί με 86636.555... αστρικά δευτερόλεπτα. Η μεγαλύτερη διάρκεια (κατά 4 περίπου λεπτά) οφείλεται στον συνδυασμό περιστροφής και περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο.
- Οι κλίμακες αυτές ορίζονται με την βοήθεια του εαρινού ισημερινού σημείου Υ . Η μετακίνηση του Υ εξ αιτίας της μετάπτωσης και της κλόνησης της Γης επηρεάζει τον αστρικό χρόνο.
- Από την ιδιοσυχνότητα συντονισμού του ατόμου του καισίου ορίζεται το δευτερόλεπτο SI, που δημιουργεί την κλίμακα του Ατομικού Χρόνου. Σε σχέση με αυτήν, η κλίμακα του αστρικού χρόνου, συνεπώς και του Παγκόσμιου Χρόνου, παρουσιάζει πολλές μικρομεταβολές, που οφείλονται στις ανωμαλίες της περιστροφής της Γης.
- Ο Συντονισμένος Χρόνος UTC και ο Πολιτικός Χρόνος κάθε χώρας, που βασίζεται σ' αυτόν, έχουν το σταθερό μέτρο του ατομικού χρόνου (δευτερόλεπτο SI) αλλά παρακολουθούν από κοντά την πορεία του Παγκόσμιου Χρόνου με την εισαγωγή εμβόλιμων δευτερολέπτων, όταν χρειάζεται. Το ίδιο σταθερό μέτρο έχει και ο Γήινος Χρόνος TT.