

74

CONTRIBUTI  
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI MILANO-MERATE  
a cura del Direttore  
Prof. FRANCESCO ZAGAR

**NUOVA SERIE**

**N. 264**

EDOARDO PROVERBIO - FRANCA CHLISTOVSKY

---

**Determinazione e comparazione  
delle scale di tempo atomico e rotazionale**

Nota comunicata al X Convegno della Società Astronomica Italiana  
(Catania, 27 - 29 Giugno 1966)

*Scuola Salesiana del Libro - Catania*

---

1967

EDOARDO PROVERBIO - FRANCA CHLISTOVSKY

---

**Determinazione e comparazione  
delle scale di tempo atomico e rotazionale**

Nota comunicata al X Convegno della Società Astronomica Italiana  
(Catania, 27 - 29 Giugno 1966)

## DETERMINAZIONE E COMPARAZIONE DELLE SCALE DI TEMPO ATOMICO E ROTAZIONALE

EDOARDO PROVERBIO - FRANCA CHLISTOVSKY

(*Osservatorio Astronomico di Brera - Milano*)

RIASSUNTO. — Si discutono i risultati delle determinazioni delle scale di tempo fisico — tempo coordinato (UTC) e tempo integrato (T.I.) — e della scala di tempo astronomico UT2.

La precisione e la stabilità delle due scale di tempo fisico è comparabile con quella di altre scale europee e nordamericane.

L'analisi della scala di UT2 mette in evidenza il progressivo rallentamento della rotazione della terra per il periodo in esame (circa 1  $\mu$ sec per giorno).

La determinazione dello scarto tipo per le varie scale mostra che attualmente la più grande precisione nelle comparazioni di tempo è ottenibile mediante l'impiego di trasmissioni su onde miriametriche.

ABSTRACT. — The authors discuss the results of the determination of the physical time scales coordinate time (UTC) and integrated time (T.I.) — and astronomical time scale UT2.

The accuracy and stability of the two time scales is comparable with that of the other european and northamerican scales.

The UT2 time scales' analysis shows the progressive slackening (about 1  $\mu$ sec every day) of the earth's rotation during the considered period.

The determination of the standard deviation  $\sigma$  relative to the different scales shows that at the present the greatest accuracy in the time comparisons is obtainable using very low frequency radio broadcasts.

### LE SCALE DI TEMPO FISICO ED ASTRONOMICICO

1. - L'introduzione, sia pure per il momento non ufficiale, dell'unità di tempo fisico, basata sulla frequenza convenzionale adottata di 9 192 631 770 Hz per il campione atomico al cesio, ha permesso in questi ultimi anni di costituire per integrazione diverse scale di tempo fisico basate su campioni atomici (T. A.).

L'importanza di queste scale è notevole poichè risultando esse di gran lunga più uniformi delle scale di tempo astronomico (rotazionale) permettono

di determinare con sempre maggiore precisione le variazioni irregolari e progressive della velocità di rotazione della terra, assumendo inoltre un grande interesse anche per le ricerche di astrometria fondamentale (ricerche di catalogo).

D'altra parte per numerose discipline di osservazione l'impiego della scala di tempo rotazionale risulta di vitale importanza.

L'impossibilità di disporre con la necessaria rapidità di questa ultima scala per le applicazioni dirette ha suggerito, come è noto, la costituzione della nuova *scala di tempo coordinato*, basata su un campione fisico di frequenza che ne garantisca l'uniformità e che, nello stesso tempo, non si discosti notevolmente (lo scarto si mantiene in genere inferiore a 100 ms) dalla scala di tempo rotazionale UT2.

Nel Servizio dell'ora dell'Osservatorio di Brera vengono determinate e conservate le scale di tempo rotazionale UT2<sub>Mi</sub> e di tempo coordinato UTC<sub>Mi</sub>. La prima basata sulle osservazioni astronomiche di tempo e la seconda sul secondo fisico fornito dall'oscillatore a quarzo campione dell'Osservatorio (1). Lo studio e le prestazioni di questo campione di tempo fisico sono state oggetto di precedenti ricerche (2). Lo scopo di questa nota è quello di fornire e discutere i dati ed i risultati conseguiti nella costituzione e conservazione della scala di tempo fisico ed astronomico.

Le caratteristiche di queste scale, e lo studio dei fenomeni ad esse connessi mettono in evidenza la loro stabilità intrinseca ottenuta per confronto con altre scale di tempo astronomico e fisico (atomico).

La fig. 1 rappresenta l'andamento delle scale di tempo UT2<sub>Mi</sub> e UTC<sub>Mi</sub> rispetto alle scale di tempo atomico A.1 dell'Osservatorio di Washington. I dati si riferiscono a tutto il 1965 fino al maggio 1966 e sono stati ottenuti mediante il confronto di segnali di tempo locali con i segnali orari delle emissioni WWV (15 Mc/s).

Si può osservare, in primo luogo, che durante il 1965 a causa del progressivo rallentamento nella rotazione della Terra, in atto con fasi alterne dal 1963, il tempo rotazionale ha ritardato in media di 2,22 msec al giorno rispetto al tempo atomico A.1. Ciò corrisponde ad una deviazione relativa media fra le scale A.1 e UT2<sub>Mi</sub> di circa  $-257.10^{-10}$ . È questo il motivo per cui la scala di tempo coordinato (UTC) che differisce invece convenzionalmente dalle scale di T.A. per il 1965 di  $-150.10^{-10}$  ha dovuto subire nel corso dell'anno più di una correzione di 100 ms (vedi fig. 1).

Sempre per questo fatto all'inizio del 1966 il B.I.H. ha deciso di portare la deviazione in frequenza delle scale UTC rispetto alla T.A. a  $-300.10^{-10}$ . Con quest'ultima correzione la scala UTC<sub>Mi</sub> risulta in buon accordo, almeno per il primo trimestre 1966, con la scala atomica A.1.

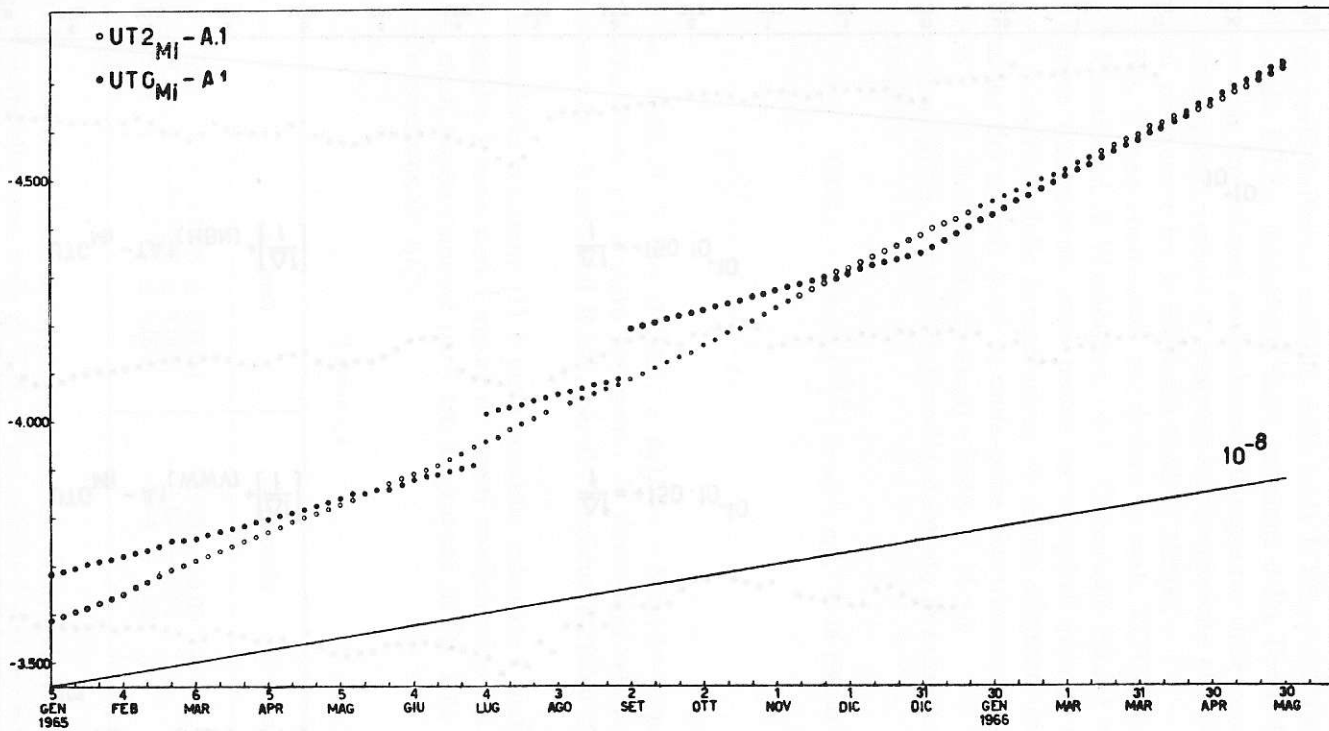


Fig. 1

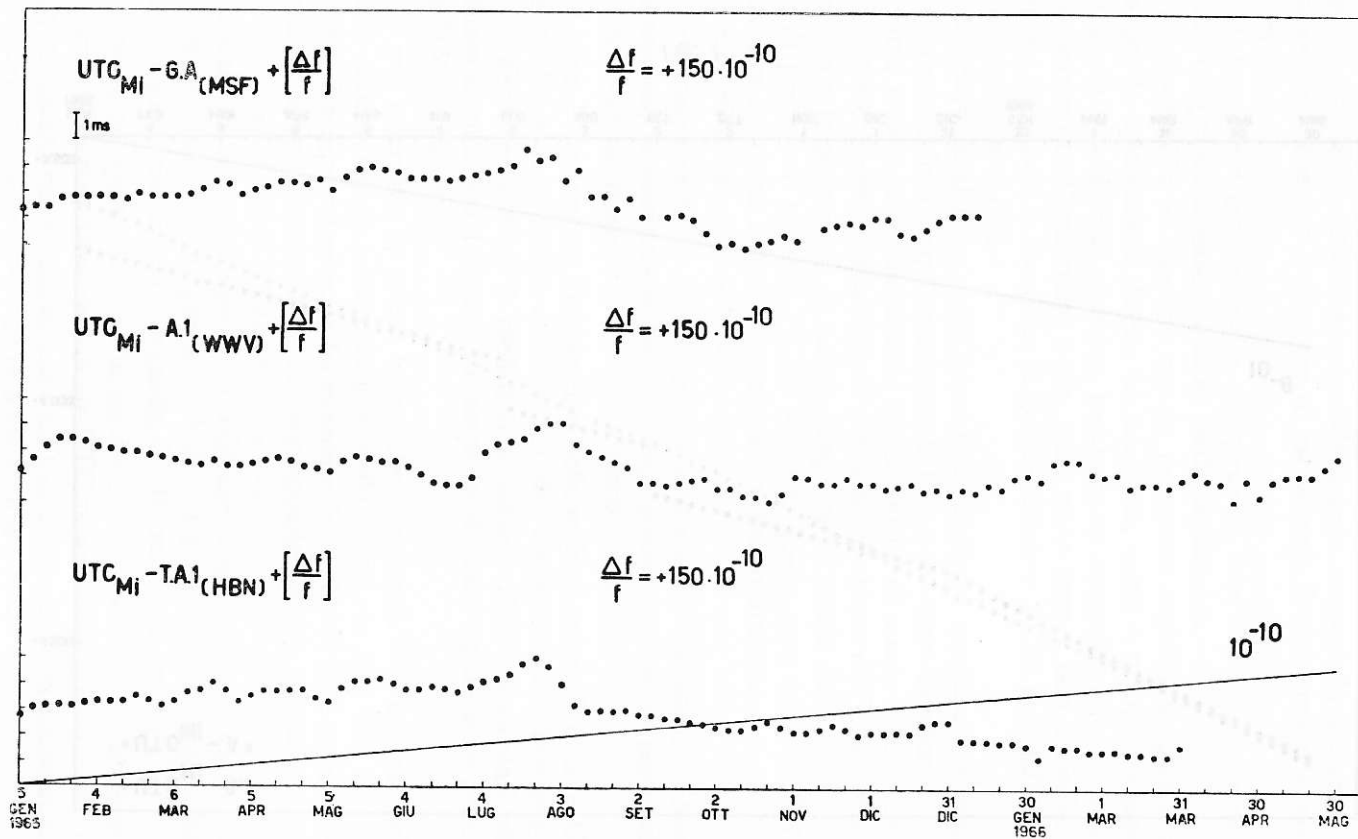


Fig. 2

È difficile tuttavia mettere in evidenza dall'analisi dei diagrammi di fig. 1 da una parte l'effettiva stabilità della scala  $UTC_{Mi}$ , dall'altra le variazioni della scala  $UTC_{Mi}$  dipendenti dalla rotazione della Terra. Per fare ciò è stato necessario amplificare notevolmente il rapporto delle coordinate eliminando contemporaneamente le componenti sistematiche che determinano le deviazioni progressive tra le differenti scale di tempo.

Nella Fig. 2 sono confrontate tra di loro le scale  $UTC_{Mi}$  e le scale di T.A. degli Osservatori di Washington (A.1), Greenwich (G.A.) e Neuchatel (TA.1). Queste ultime scale sono basate su campioni atomici al cesio. Il confronto è il risultato delle comparazioni di tempo effettuate giornalmente con la ricezione dei segnali orari su onde corte rispettivamente per le emissioni di WWV (15 Mc/s), MSF (5 Mc/s) e HBN (5 Mc/s).

I diagrammi di fig. 2 rappresentano l'andamento in funzione del tempo  $t$  delle quantità:

$$(1) \quad UTC_{Mi} - T.A. + \left( \frac{\Delta f}{f} \right) = a_0 + a_1 t, \quad (t \text{ in giorni})$$

in cui

$$\left( \frac{\Delta f}{f} \right) = \int_0^t \frac{\Delta f}{f} dt,$$

ove  $\Delta f/f = -150 \cdot 10^{-10}$  (per il 1965) e  $\Delta f/f = -300 \cdot 10^{-10}$  (per il 1966), rappresentano, come già è stato accennato, le deviazioni relative della frequenza nominale adottata dal B.I.H. per il campione atomico di frequenza al cesio.

Utilizzando la relazione (1) è pure possibile calcolare i coefficienti  $a_0$  e  $a_1$ . Nella tabella I sono dati i valori di questi coefficienti e dei loro errori quadratici medi rispettivamente per i tre diagrammi di fig. 1 (a meno della deviazione convenzionale  $\Delta f/f$ ).

TABELLA I

|                   | $a_0$ (sec)           | $a_1$ ( $\mu\text{sec/d}$ ) | $\sigma$ (msec) |
|-------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|
| $UTC_{Mi} - A.1$  | $-3.7808 \pm 0.0000$  | $-2.18 \pm 0.01$            | $\pm 0.6$       |
| $UTC_{Mi} - TA.1$ | $-34.8040 \pm 0.0001$ | $-4.87 \pm 0.01$            | $\pm 0.6$       |
| $UTC_{Mi} - G.A.$ | $-4.7115 \pm 0.0001$  | $-4.44 \pm 0.02$            | $\pm 0.7$       |

Il valore del coefficiente  $a_0$  rappresenta lo stato della scala  $UTC_{Mi}$  all'epoca  $t = 0$  rispetto alle varie scale di T.A. la cui origine è stata stabilita secondo particolari criteri dei Servizi orari interessati.

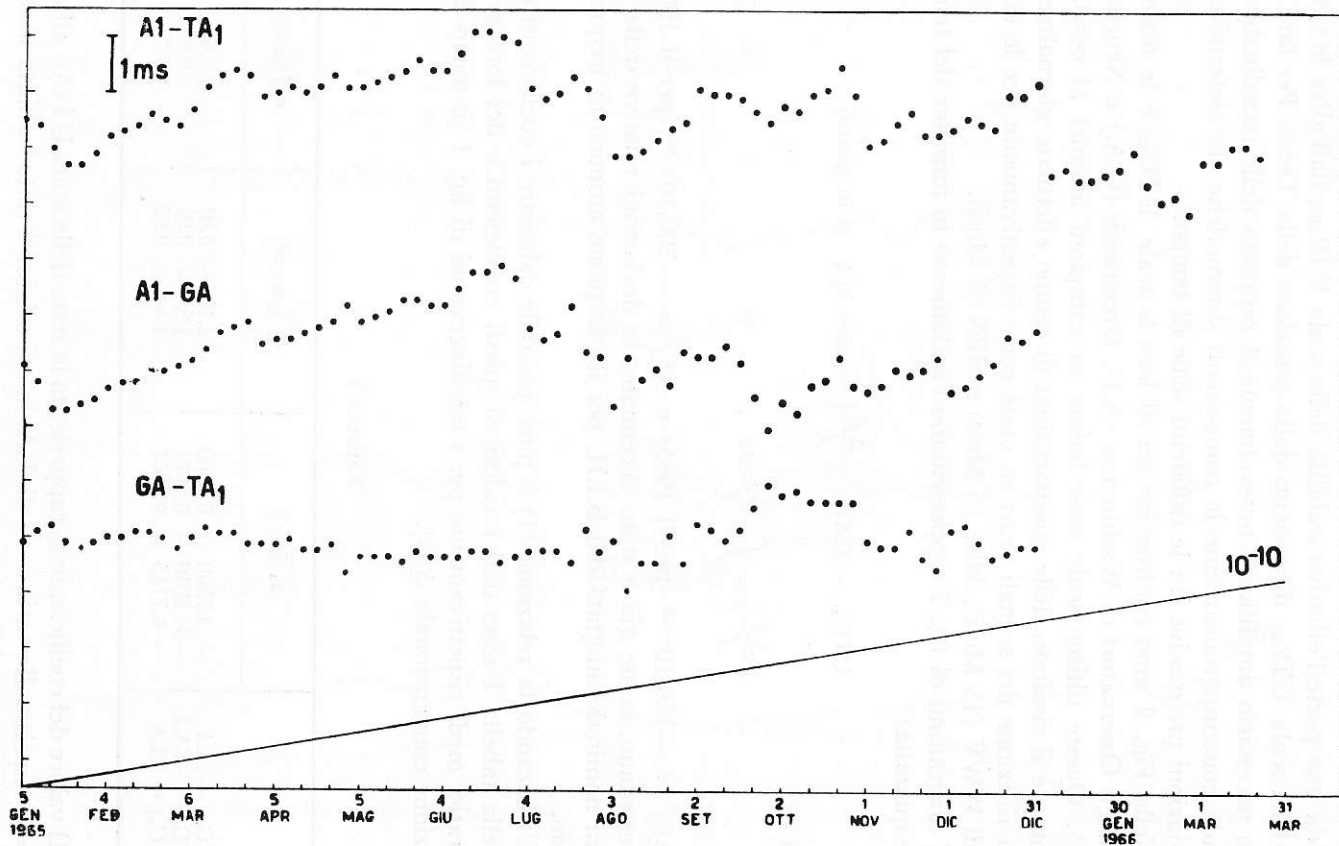


Fig. 3



Dai valori di  $a_1$  riportati nella tabella I ne consegue che la deviazione in frequenza della scala  $UTC_{Mi}$  rispetto al tempo atomico medio delle tre scale risulta per il periodo considerato di  $-4.10^{-11}$ .

Lo scarto tipo (varianza)  $\sigma$  relativo ai vari confronti è dato pure nella tabella I.

Come elemento di riferimento per la stabilità della scala di tempo  $UTC_{Mi}$  sono dati nella figura 3 i diagrammi relativi alla comparazione tra le tre scale di T.A. qui considerate. I diagrammi mettono in evidenza, per il periodo considerato, il buon accordo tra le due scale europee TA.1. e G.A., accordo confermato sia dallo scarto tipo  $\sigma$  relativo al confronto TA.1 — G.A. che risulta  $\pm 0^s.0003$ , sia dall'andamento generale dei tre diagrammi stessi.

Lo scarto tipo relativo ai primi due diagrammi di fig. 3 risulta  $\pm 0.0006$ , ed è quindi dello stesso ordine degli scarti ottenuti mediante il confronto con la scala  $UTC_{Mi}$ .

#### IL TEMPO ROTAZIONALE E LA ROTAZIONE DELLA TERRA

2. - L'andamento del tempo rotazionale  $TU2_{Mi}$ , cioè del tempo rotazionale osservato corretto per il movimento del polo istantaneo della Terra ( $\Delta\lambda$ ) e per le variazioni stagionali della rotazione della Terra ( $\Delta T_s$ ) è visibile in fig. 4. Questa figura riporta in ordinata le differenze  $UT2_{Mi} - UTC_{Mi}$  a meno della deviazione arbitraria di frequenza  $\Delta f/f = +100.10^{-10}$  tra le due scale.

Poichè, come si è visto, la scala  $UTC_{Mi}$ , sempre a meno della deviazione convenzionale della frequenza, risulta notevolmente stabile rispetto al T.A., si può ritenere che l'andamento in funzione del tempo della differenza  $UT2_{Mi} - UTC_{Mi} + \Delta f/f$ , sia unicamente imputabile alle scale  $UT2_{Mi}$ , cioè al tempo rotazionale.

Questa conclusione è confermata dall'andamento delle curve di fig. 5:

$$UT2_{Mi} - T.A. + \left(\frac{\Delta f}{f}\right), \quad (T.A. = TA.1, A.1)$$

nelle quali  $\Delta f/f = +250.10^{-10}$ , che rappresentano l'andamento della scala  $UT2_{Mi}$  rispetto alle due scale di T.A.

La velocità relativa di rotazione della terra dedotta dalla curva di fig. 4 e fig. 5 è rappresentata per il periodo gennaio 1965-maggio 1966, in fig. 6. In questa figura viene rappresentato l'andamento degli scarti tra il tempo rotazionale, cioè tra la velocità di rotazione della terra, e le scale di tempo UTC ed A.1. La scala a sinistra di fig. 6 rappresenta le variazioni mensili

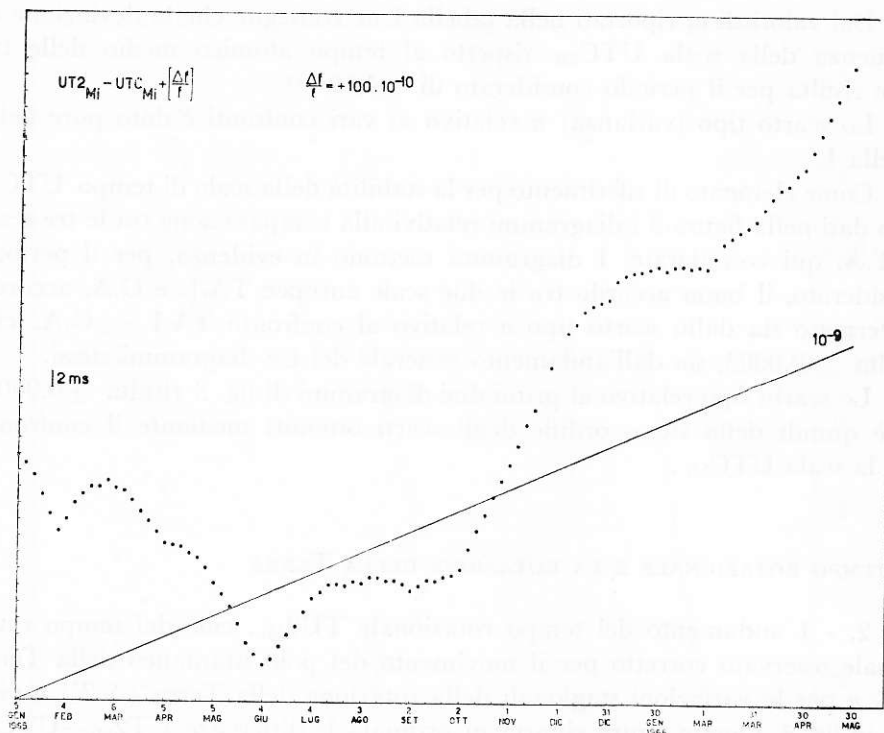


Fig. 4

della rotazione della terra espresse in msec. Le scale a destra rappresentano rispettivamente le variazioni giornaliere della rotazione della terra (in msec) e gli scarti relativi (in unità  $10^{-10}$ ) rispetto alle due scale UTC ed A.1.

La discontinuità nella curva  $\Delta (UT2_{Mi} - UTC_{Mi})$  è dovuta al cambiamento nel valore della deviazione della frequenza della scala UTC rispetto alla scala T.A. da  $-150 \cdot 10^{-10}$  a  $-300 \cdot 10^{-10}$  avvenuto il 1° gennaio 1966.

Nella stessa figura sono dati i risultati degli scarti  $\Delta (UT2 - UTC)$  ricavati dalle osservazioni astronomiche effettuate a Neuchâtel e Besançon, che confermano, nell'ordine di approssimazione degli errori di osservazione, i risultati di Milano.

Molto più significativo per ciò che concerne la variazione del tempo rotazionale è l'andamento degli scarti  $\Delta (UT2 - A.1)$  che mostrano una diminuzione progressiva della velocità di rotazione della terra.

In 15 mesi la durata del giorno è aumentata, per il periodo in esame, di circa 0,5 msec. ciò che corrisponde ad un rallentamento progressivo della

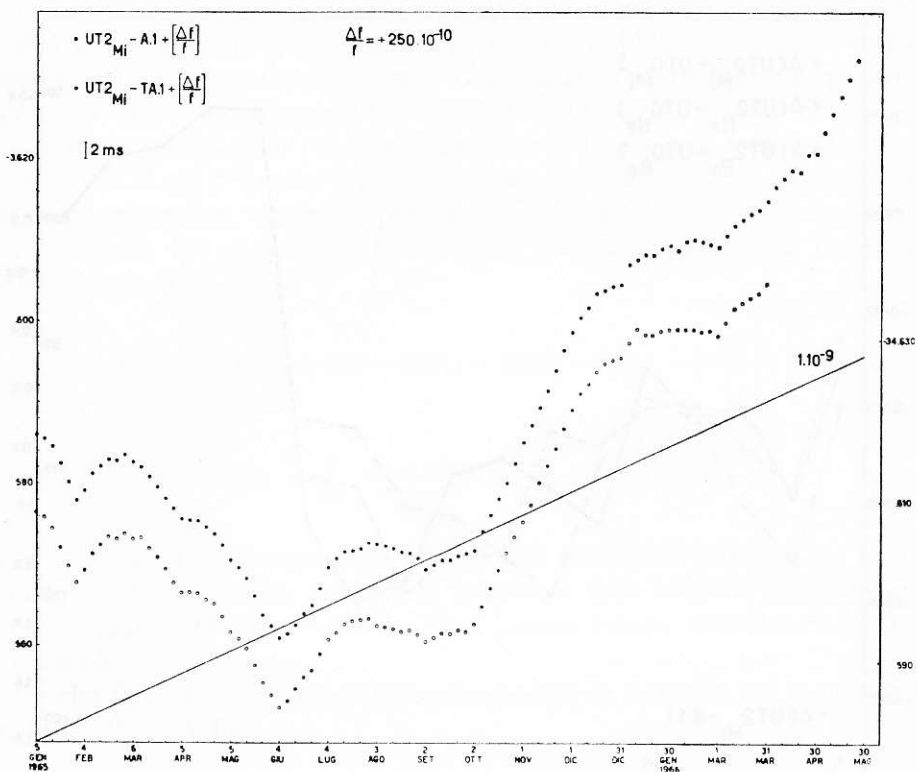


Fig. 5

rotazione terrestre di circa  $1 \mu\text{sec}$  per giorno. Questo rallentamento risulta notevolmente superiore a quello attribuito all'accelerazione secolare del Sole ( $0,046 \mu\text{sec}$  per giorno).

Oltre a queste variazioni progressive sono evidenti nell'andamento degli scarti  $\Delta (UT2_{Mi} - A.1)$  delle variazioni di tipo accidentale di notevole ampiezza. Queste variazioni il cui importo raggiunge valori di parecchi  $\mu\text{sec}$  per giorno meritano di essere maggiormente studiate utilizzando un lungo periodo di osservazione ed analizzando i dati di più Osservatori.

#### LA SCALA DI TEMPO FISICO INTEGRATO

3. - La scala di tempo  $UTC_{Mi}$  è basata come è stato detto sul secondo di tempo coordinato, ricavato per integrazione della frequenza dell'oscillatore campione P1 del Servizio dell'Ora dell'Osservatorio di Brera.

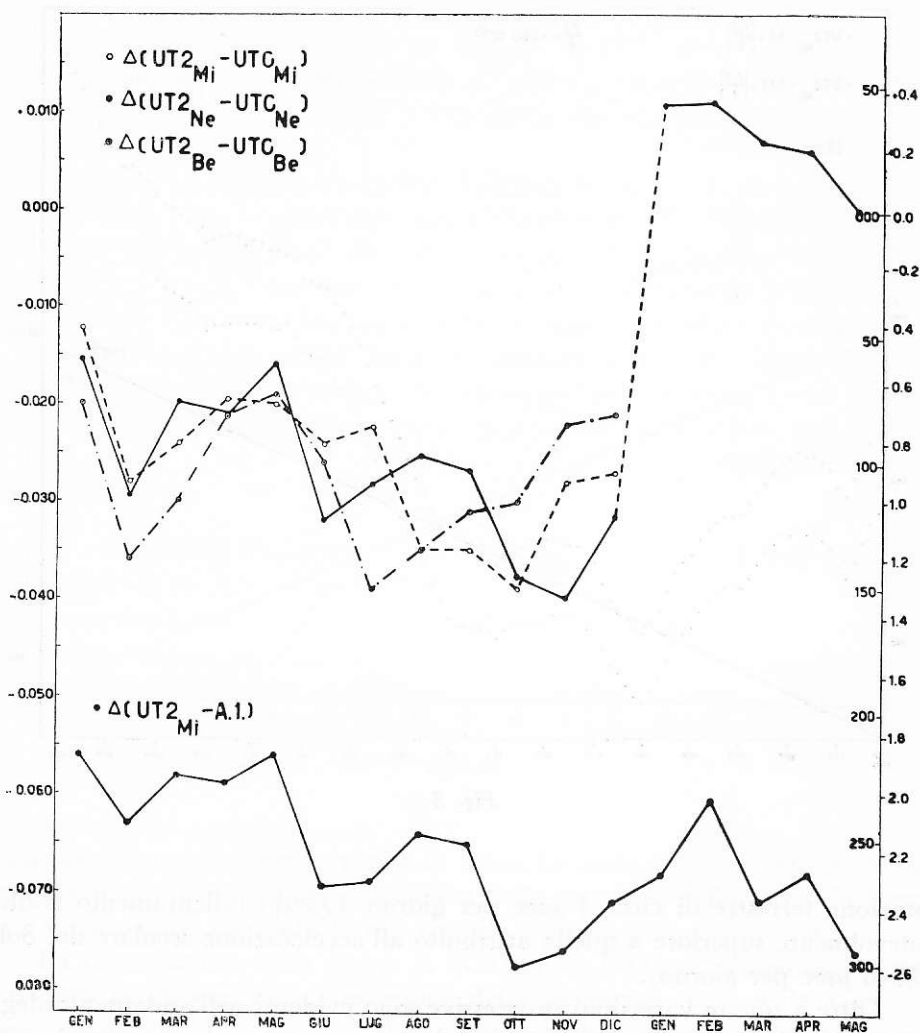


Fig. 6

Questa scala non risulta uniforme a causa delle discontinuità determinate dalle correzioni più o meno periodiche cui è soggetta. Tuttavia è possibile costruire una scala uniforme di tempo atomico attraverso l'integrazione di una frequenza atomica. Questa scala di tempo integrato può essere costruita mediante l'intermediario di un oscillatore a quarzo di elevata stabilità.

Noi abbiamo costruito dal 1965.0 una scala di tempo integrato utilizzando i confronti di frequenza a grande distanza della portante delle emis-

sioni della stazione GBR (16 Kc/s). I dati che qui presentiamo si riferiscono al solo anno 1965; tuttavia saranno in seguito pubblicati sulle *Astronomical Circulars* dell'Osservatorio di Brera i dati relativi al 1966 fino alla prossima entrata in funzione dell'orologio atomico al rubidio dell'Osservatorio.

Il metodo impiegato per la realizzazione delle scale di tempo (atomico) integrato ( $T.I._{Mi}$ ) è quello utilizzato presso il B.I.H. (3). Chiamando  $\Delta f$  gli scarti giornalieri tra la frequenza del campione locale e la frequenza convenzionale del campione al cesio con l'intermediario della frequenza della stazione GBR si ha:

$$T.I._{Mi} = (T.I.)_o + (P1 - GBR) + (GBR - G.A.) + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)$$

in cui

$$(P1 - GBR) = \int_0^t \frac{f_{P1} - f_{GBR}}{f_{GBR}} dt ,$$

viene ricavato dalla integrazione degli scarti giornalieri esistenti tra la frequenza  $f_{P1}$  dell'oscillatore locale e la frequenza della stazione GBR, mentre il valore delle differenze  $(GBR - G.A.)$  viene fornito dall'Osservatorio di Greenwich.

Nella fig. 7 sono rappresentati i diagrammi in funzione del tempo delle quantità  $(P1 - GBR)$  e

$$(2) \quad P1 - G.A._{(GBR)} + \left(\frac{\Delta f}{f}\right) = (T.I.)_{Mi} - (T.I.)_o$$

Nella stessa figura è inoltre rappresentata la funzione

$$(3) \quad UTC_{Mi} - G.A._{(GBR)} + \left(\frac{\Delta f}{f}\right) = (\Delta UTC_{Mi}) (GBR)$$

quale risulta dai confronti tra il tempo  $UTC_{Mi}$  corretto per le due discontinuità di 100 msec e la scala di tempo G.A. ricavata dalla ricezione dei segnali orari onde lunghe della stazione GBR (16 Kc/s).

Sottraendo la (3) dalla (2), assegnando a  $(T.I.)_o$  il valore  $0^s.200$  per compensare il fatto di aver trascurato nella (3) le due discontinuità di 100 msec, si hanno i valori delle differenze  $UTC_{Mi} - P1$ , cioè i valori delle differenze tra la scala di UTC (senza discontinuità) e la scala di tempo integrato (fig. 7).

L'andamento di questa funzione presenta una variazione sistematica tra le due scale di circa  $2 \mu\text{sec}$  per giorno ( $2 \cdot 10^{-11}$ ).

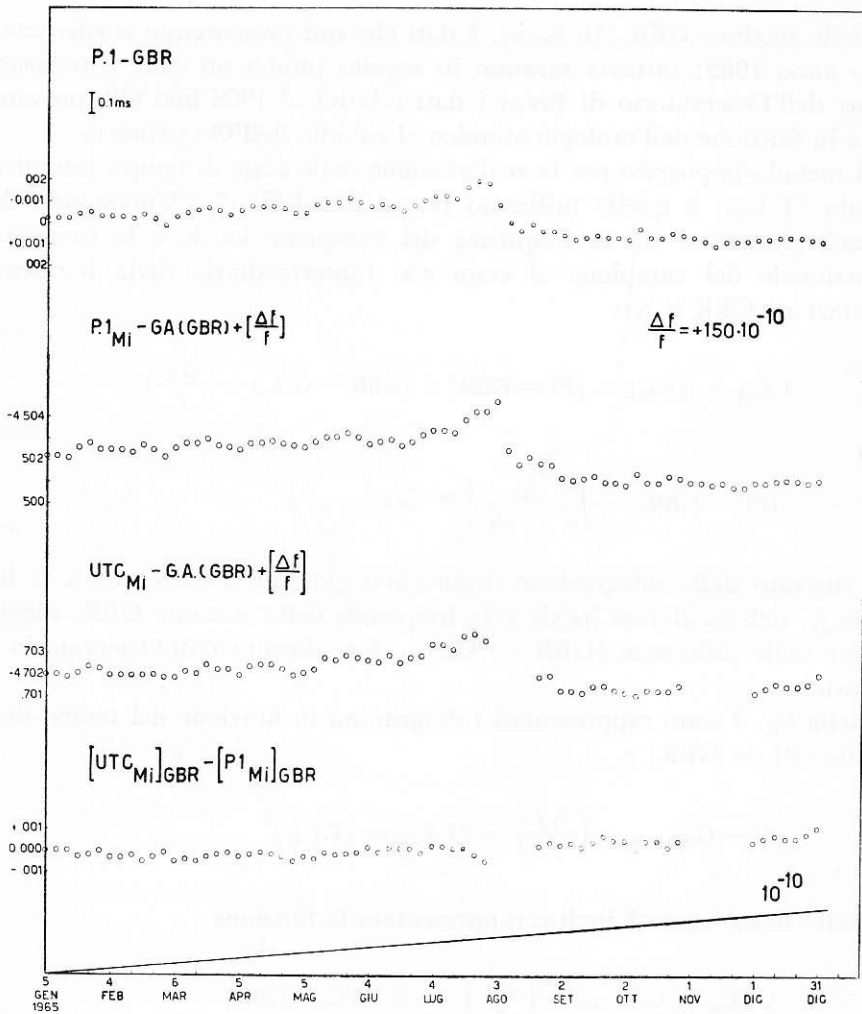


Fig. 7

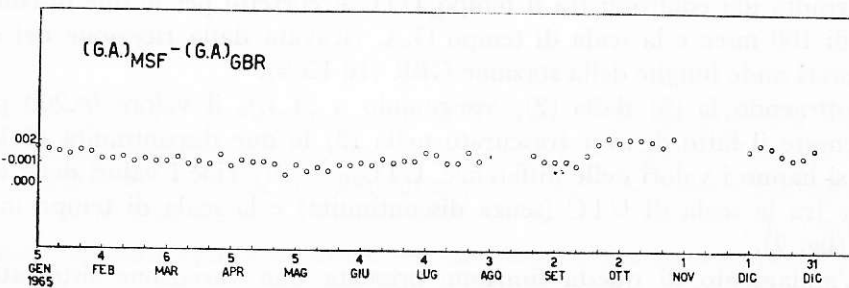


Fig. 8

Questa differenza può essere dovuta ad una variazione di fase tra le emissioni di segnali orari onde lunghe e la fase della frequenza campione (16 Kc/s) emessa dalla medesima emittente.

#### LA COMPARAZIONE DEL TEMPO

Lo scarto tipo rilevato dal diagramma  $UTC_{Mi} - P1$  risulta circa  $0^s.0003$ .

Si può ritenere che questa quantità rappresenta quindi il valore della precisione massima raggiungibile mediante l'impiego di segnali orari onde lunghe o della frequenza atomica integrata nel confronto tra due scale di tempo su lungo periodo.

L'impiego di segnali orari onde corte porta a risultati meno soddisfacenti, come mostra l'andamento dei confronti tra la scala di tempo atomico G.A. (fig. 8), ottenuto indirettamente mediante ricezione di segnali orari onde lunghe (GBR, 16 Kc/s) ed onde corte (MSF, 5.000 Mc/s).

Lo scarto tipo di questi confronti risulta infatti di  $0^s.0005$ .

Le cause delle irregolarità e delle deviazioni aleatorie e progressive tra le varie scale di T.A. e UTC possono essere imputate:

a) a variazioni nella propagazione dei segnali orari e delle frequenze campioni;

b) a variazioni nella fase dei segnali orari e delle frequenze campioni all'emissione rispetto alla scala di tempo convenzionale basata sulla frequenza adottata per il campione al cesio;

c) a differenze sistematiche tra le diverse scale indipendenti di T.A. integrato.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) PROVERBIO E. - Confer. dell'Oss. Astron. di Milano - Merate N. 6, 1966.
- (2) PROVERBIO E. - Actes du Congrès Inter. de Chron. (Lausanne), 139, 1964.
- (3) PROVERBIO E. - Rendic. Ist. Lomb. Sc. e Lett., Vol. 98, 449, 1964.
- (4) STOYKO A. - Bull. Hor., N. 1 (serie H), 1963.

CONTRIBUTI  
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICOMI DI MILANO-MERATE

---

NUOVA SERIE

- 231 - E. PROVERBIO - *Osservazioni sulla propagazione di segnali orari su 2.500 e 5.000 Mc/s durante l'eclisse totale di sole del 15 febbraio 1961.*
- 232 - R. FARAGGIANA, *Quantitative analysis of  $\gamma$  Capricorni.*
- 233 - A. MASANI - *La produzione di neutrini nei plasmi ad altissima temperatura.*
- 234 - E. PROVERBIO - *Ricerche sulla marcia e sulla deriva di campioni di frequenza a quarzo.*
- 235 - E. PROVERBIO - *Sur la détermination du facteur de qualité du Système Balancier - Spiral d'un oscillateur mecanique.*
- 236 - M. FRACASSINI, L. E. PASINETTI - *Teorie e problemi attuali sulle variazioni della brillantezza della luce zodiacale (L.Z.) e anti solare (A.S.) e delle emissioni del cielo notturno (airglow) in relazione al ciclo solare e lunare.*
- 237 - A. MASANI, R. GALLINO, G. SILVESTRO - *Neutrino Emission of Massive Star Evolutions, in the Late Stages.*
- 238 - R. FARAGGIANA, A. GÖKGÖZ, M. HACK, I. KENDIR - *Spectrographic Observations of the 1962 Eclipse of 32 Cygni.*
- 239 - C. DE CONCINI, E. PROVERBIO - *Determinazione unilaterale della differenza di longitudine tra Milano (Brera) e Solferino e valutazione critica dei metodi di riduzione.*
- 240 - E. PROVERBIO - *Sulla determinazione delle variazioni della curvatura media di una livella e delle irregolarità di curvatura.*
- 241 - E. PROVERBIO - *Determinazione degli errori progressivi e del passo della vite micrometrica di un micrometro di latitudine con stelle a bassa declinazione.*
- 242 - E. PROVERBIO - *Sulla determinazione dell'equazione personale mediante osservazioni di passaggi di meridiano.*
- 243 - E. PROVERBIO - *Sulla determinazione astronomica del tempo e sull'impiego del metodo di Döllén in meridiano in determinazioni di elevata precisione.*
- 244 - E. PROVERBIO, F. CHLISTOVSKY - *Sulle variazioni a corto periodo della velocità di rotazione della terra.*
- 245 - A. MASANI, R. GALLINO, G. SILVESTRO - *L'astronomia del neutrino.*
- 246 - E. PROVERBIO, L. MARTINENGI - *Programmi di riduzione su calcolatore elettronico delle Osservazioni Astronomiche di Tempo e di Azimut.*
- 247 - E. PROVERBIO - *Amplificateur de temps et dispositifs de comparaison des pendules astronomiques de précision très élevée.*
- 248 - F. ZAGAR - *Astronomia classica e Meccanica celeste.*
- 249 - E. PROVERBIO - *Sulla riduzione delle osservazioni fotografiche di eclissi solari in vista di applicazioni astrometriche e geodetiche di elevata precisione.*
- 250 - A. MANARA - *La strumentazione dell'Osservatorio di Brera in Milano per l'inseguimento ottico dei satelliti artificiali.*
- 251 - L. SANTOMAURO - *L'applicazione dell'Astrodinamica allo studio dell'alta atmosfera.*
- 252 - G. DE FAZIO, F. JOB, E. PROVERBIO - *Programmazione delle osservazioni di stelle in meridiano col metodo di Döllén mediante calcolatore IBM 1620.*
- 253 - M. FRACASSINI, L. E. PASINETTI - *Il contributo cometario alla luce zodiacale e all'airglow.*
- 254 - E. PROVERBIO, F. CHLISTOVSKY - *Determinazione astronomica degli errori personali assoluti nelle osservazioni di tempo e ricerche sugli errori di catalogo.*



CONTRIBUTI  
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICICO DI MILANO-MERATE

---

NUOVA SERIE

- 255 - J. O. FLECKENSTEIN-GALLO - *Risultati definitivi delle osservazioni di latitudine all'Osservatorio di Brera durante l'anno geofisico 1957-1958.*
- 256 - A. MANARA - *Sulla determinazione del sorgere e della velocità angolare dei satelliti artificiali per l'orizzonte di Milano.*
- 257 - C. DE CONCINI, E. PROVERBIO - *Determinazione astronomica degli Asimut reciproci e dei residui di Laplace lungo la geodetica Aquileia-Opicina.*
- 258 - E. PROVERBIO - *Preliminary declination corrections of the Milan latitude Zenith Program.*
- 259 - E. PROVERBIO - *L'utilisation des pendules astronomiques dans la détermination des marées terrestres.*
- 260 - C. DE CONCINI, E. PROVERBIO - *Studio e determinazione della rifrazione atmosferica laterale e verticale in Opicina.*
- 261 - J. O. FLECKENSTEIN-GALLO - *Le edizioni nazionali delle opere complete dei classici della storia delle matematiche dei secoli XVII e XVIII.*
- 262 - M. FRACASSINI - *Applicazione del metodo di Gröbner ai problemi della meccanica celeste.*
- 263 - M. FRACASSINI, L. E. PASINETTI - *Riduzione automatica di spettri stellari.*