G10. Il tempo nell'astronomia moderna

Tempo Universale e Tempo Civile

Una volta ottenuto il TS di Greenwich Θ_G, lo si trasforma in TSM mediante l'opportuno fattore di scala, e si ricava il cosidetto *Tempo Universale* (TU) che è il TSM, cioè l'angolo orario aumentato di 12^h del Sole medio, relativo al meridiano dell'osservatorio di Greenwich (talora si trova ancora la vecchia denominazione GMT = Greenwich Mean Time). La denominazione di Tempo Universale deriva dalla necessità di avere un comune riferimento temporale in situazioni che coinvolgono simultaneamente punti qualunque della Terra.

Per gli usi civili però resta fondamentale il riferimento al ciclo diurno del Sole, anche se si è reso necessario superare il concetto di tempo locale secondo la definizione strettamente astronomica: basti pensare che alla latitudine media dell'Italia il TSM locale differisce di 1^s tra due punti distanti circa 330 m in direzione Est-Ovest. Già dalla fine del XIX secolo si è dunque convenuto di adottare una definizione di tempo che valesse in regioni sufficientemente vaste; da qui la divisione della superficie della Terra in 24 *fusi orari*, entro i quali si è fissato di adottare come *Tempo Civile* (TC) il TSM del meridiano centrale di ciascun fuso. In questo modo si dovrà provvedere alla regolazione degli orologi solo passando da un fuso a quello contiguo (circa 1170 km alle nostre latitudini).

Il TC così definito non dovrebbe differire mai per più di mezz'ora dal TSM di ciascuna località. In realtà questo non è sempre vero: sia perché i limiti dei fusi orari sono stati adattati ai confini degli stati, sia perché recentemente si è preferito unificare il tempo di stati confinanti anche se appartenenti a fusi diversi (ad es. quasi tutta l'Europa adotta lo stesso tempo); al contrario negli stati di notevole estensione (USA e Russia ad es.) resta la necessità di usare tempi diversi.

Il TC adottato in Italia nel periodo invernale, Ottobre-Marzo, (denominato in modo infelice "Ora Solare") è il *Tempo Medio dell'Europa Centrale* (TMEC) corrispondente al TU aumentato di 1^h, mentre nel semestre estivo la cosiddetta "Ora Legale" è più propriamente il *Tempo Medio dell'Europa Orientale* (TMEO), pari al TU aumentato di 2^h.

Il TMEC coincide con il TSM locale solo per le località posta a 15° Est di Greenwich; se si vuole il TSM locale di un altro luogo occorre un'ulteriore correzione. Ad es. per Pisa ($\lambda = 41^m 35^s$ Est) la correzione è di circa $18^m 25^s$:

$$\mathrm{TSM}_{\mathrm{Pisa}} = \mathrm{TU} + 41^m 35^s = \mathrm{TMEC} - 18^m 25^s.$$

Relazione esatta fra TU e TS

Vediamo ora più in dettaglio la relazione fra Tempo Siderale e TSM: per questo supporremo di conoscere α_m (ascensione retta del Sole medio) a un certo istante. Sappiamo che il TU è pari all'angolo orario del Sole medio a Greenwich più 12^h: $\mathrm{TU} = H_\mathrm{m} + 12^\mathrm{h}$. Poiché $\Theta_\mathrm{G} = H_\mathrm{m} + \alpha_\mathrm{m}$ avremo

$$\mathrm{TU} = \Theta_\mathrm{G} - \alpha_\mathrm{m} + 12^\mathrm{h}$$

da cui conoscendo $\alpha_\mathrm{m}(t)$ si può avere il TU a ogni istante.

La formula attualmente in uso per convenzione internazionale (1984) e che comprende tutto quanto detto, è la seguente:

$$\Theta_{\mathrm{G}0} = 6^\mathrm{h}41^\mathrm{m}50^\mathrm{s}.54841 + 8640184.812866\,T + 0.093104\,T^2 - 6.2\cdot 10^{-6}\,T^3 \quad \text{(G10.1)}$$

dove $\Theta_{\mathrm{G}0}$ è il TS a Greenwich a 0^h TU1; T è il tempo trascorso dal 2000 Jan $1^\mathrm{d}12^\mathrm{h}$ (TU1) e gli ultimi tre termini sono espressi in secondi quando T è misurato in *secoli giuliani*. (Il secolo giuliano è per definizione di 36525 giorni solari medi, il che è quanto dire che l'anno giuliano è di 365 giorni e 1/4).

Nota: Si sarà notata la comparsa di TU1 al posto del TU finora usato: si tratta del TU corretto per il moto del Polo. Infatti, come già detto al Cap. G7, il moto del Polo non influisce solo sulle coordinate: attraverso la variazione della longitudine di un osservatorio altera anche la relazione fra tempo locale e tempo universale. Più avanti torneremo su questo punto.

Analizzando l'espressione (G10.1) troviamo che il primo addendo rappresenta $\alpha_\mathrm{m} - 12^\mathrm{h}$ all'istante sotto specificato. Il secondo addendo esprime il moto uniforme del Sole medio: questo percorre dunque 86401.84812866 secondi di ascensione retta in un anno (giuliano). Dato che 86400^s sono pari a 24^h cioè a $360°$, ciò significa che in un anno giuliano il Sole medio fa più di un giro. Perciò l'anno tropico è più corto dell'anno giuliano, e precisamente:

$$\text{anno tropico} = \frac{86400}{86401.84812866}\,\text{anno giuliano} \qquad \text{(G10.2)}$$

(il discorso logicamente corretto sarebbe l'inverso: in effetti da una misura dell'anno tropico si risale a quel coefficiente). Fino a qualche decennio fa (1967) si assumeva la durata dell'anno tropico come definizione del secondo:

> un secondo (solare medio) è pari a 1/31556925.9747 dell'anno tropico al 1900 Jan 0d 12h TU.

Ci sono poi altri due addendi, i quali esprimono il fatto che il Sole accelera il suo moto in media su un anno, per cui anche il Sole medio, che per definizione coincide con il Sole vero in un punto fisso a ogni giro, deve avere un'uguale accelerazione. (Naturalmente è il moto della Terra attorno al Sole che è accelerato, a causa delle perturbazioni degli altri pianeti). In conseguenza di questa accelerazione, l'anno (siderale, e anche tropico) diminuisce nel tempo.

Dalla (G10.2) si ritrova un formula più esatta per la relazione fra giorno siderale e giorno solare. Partendo da

$$\text{g. sid.} = \frac{n}{n+1}\,\text{g. sol.}$$

(dove n = anno tropico in giorni) si ottiene, essendo un giorno solare = 24^{h} per definizione:

$$\text{g. sid.} = 23^{\mathrm{h}}56^{\mathrm{m}}4^{\mathrm{s}}\!.090524\,(\text{solari}).$$

Non sarà sfuggito il numero di cifre nelle relazioni che abbiamo riportato. È appena il caso di osservare che si tratta di cifre *significative*, nel senso che si sono rese necessarie nelle definizioni perché queste fossero in accordo con quanto danno le osservazioni, e con quanto richiesto dalle esigenze reali dei calcoli, almeno nei casi più raffinati.

Non uniformità di TU

Ci si può chiedere a questo punto se il TU è uniforme. Ma che significato ha porsi questa domanda? A meno della correzione in T^2, dovuta all'accelerazione del moto orbitale della Terra, questo è equivalente a chiedersi se Θ_{G} (il TS di Greenwich) è uniforme: ma esiste una possibilità di verificare ciò per via sperimentale, o si tratta di uno pseudoproblema di natura metafisica?

Ricordiamoci come abbiamo proceduto: ipotizzando uniforme il moto delle stelle su cui si basa Θ_{G} si sono costruiti e tarati gli strumenti che misurano il tempo, cioè gli orologi. È ora possibile scoprire sperimentalmente che Θ_{G} — e quindi in ultima analisi il moto della Terra attorno al suo asse — non è uniforme? In effetti ci sono dei buoni motivi fisici per pensare che il moto della Terra attorno al suo asse non sia uniforme: vediamone alcuni.

1) *Effetto delle maree*

A causa della rotazione terrestre, che è più veloce di quella lunare, c'è da aspettarsi che l'onda di marea per attrito si sfasi rispetto alla direzione Terra–Luna (fig. G10–1). Basti pensare che in poche ore la Luna passa dall'Atlantico al Pacifico (per la rotazione della Terra!) mentre l'onda di marea resta praticamente intrappolata, non avendo che pochi sbocchi per passare oltre l'America. Dunque in media si deve avere una situazione come quella in figura.

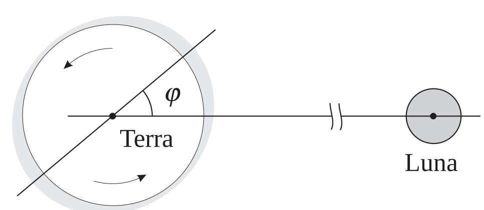

Fig. G10-1

C'è allora una distribuzione di masse oceaniche eccentriche, che risentono dell'attrazione lunare in modo diverso, essendo una più vicina e una più lontana (fig. G10–2). Il momento risultante agisce dunque come un freno, e riduce costantemente e progressivamente il momento angolare della Terra. Abbiamo qui un effetto del tipo detto "secolare," ma ci sono anche effetti periodici.

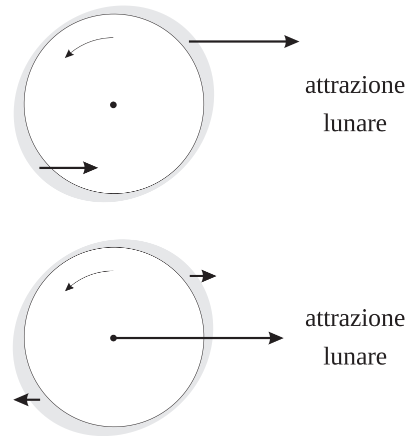

Fig. G10-2

2) *Formazione di ghiacci ai poli*

Questa comporta una variazione periodica del momento d'inerzia. Con effetto analogo ci sono anche fenomeni meteorologici, correnti marine, ecc.

3) *Moto del Polo sulla superficie terrestre*

Nella fig. G10–3 se il polo passa da P a P′ la differenza di longitudine fra gli osservatori O e O′ aumenta. Se l'osservatore O′ non tiene conto di ciò per calcolare Θ_{G} dalla sua misura di Θ_{L}, commette un errore sistematico pari alla variazione di longitudine. Il TU così determinato è designato TU0; quello corretto per il moto del Polo, come già detto, s'indica con TU1.

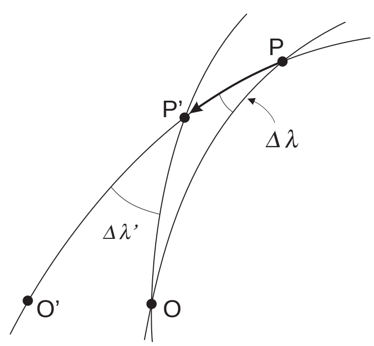

Fig. G10-3

Come si è visto, ci sono buone ragioni per sospettare che il moto terrestre di rotazione non sia uniforme; il problema è come fare per accorgersene, dato che gli orologi vengono regolati in modo che esso ci sembri uniforme! Vediamo come si supera questa difficoltà.

Gli effetti periodici sono i più semplici da osservare: basta avere un orologio della cui stabilità ci si possa fidare nel periodo dell'effetto. Ad es. gli orologi basati sulla frequenza di risonanza dei cristalli di quarzo hanno una precisione, anche a lunga scadenza, di $10^{-10} \div 10^{-11}$. Avendo allora a disposizione diversi di questi orologi, situati in punti diversi della Terra, e quindi in condizioni climatiche del tutto diverse, se accadesse che essi pur restando tra loro concordi non concordano più col TU (ricavato come visto sopra dal TS) ciò sarà da imputare a una variazione della velocità di rotazione della Terra.

Tale effetto esiste, ed è di circa $0^{\mathrm{s}}.01$ nel corso di un anno. Quegli orologi non sono però adatti per scoprire effetti di deriva secolare del tempo, dato che un effetto simile (*invecchiamento*) si manifesta anche nella frequenza di risonanza dei cristalli di quarzo.

Il Tempo delle Effemeridi

Il fenomeno secolare cui si è accennato si può però evidenziare con un ragionamento puramente astronomico, indipendente dal tipo di orologio. A tale scopo ci si basa sul moto di alcuni corpi celesti (Venere, Mercurio, Luna) le cui posizioni sono calcolabili e osservabili con estrema precisione.

Date le condizioni iniziali (ad es. al 1900 Jan $0^{\mathrm{d}}\,12^{\mathrm{h}}$) di uno di questi corpi, si può calcolare una tabella della longitudine eclittica in funzione del tempo (*effemeride*) e confrontarla con le osservazioni. (È qui importante ricordare che osservazioni precise sui pianeti ci sono dal secolo scorso, e sulla Luna fin dal '700.) Questo permette di rilevare che la longitudine eclittica osservata λ_{o} differisce da quella teorica λ_{t}: la fig. G10–4 mostra l'andamento della differenza.

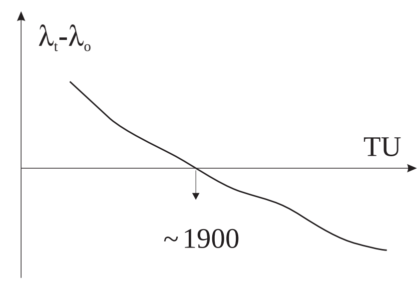

Fig. G10-4

Per qualsiasi corpo celeste si trovano curve dello stesso tipo, con deviazioni proporzionali, per ciascuno, alla sua velocità angolare. Poiché i calcoli teorici sono basati sulla legge di gravitazione universale, si potrebbe pensare che sia questa che va rimessa in discussione. Tuttavia il fatto che $\lambda_{\mathrm{t}} - \lambda_{\mathrm{o}}$ sia per i diversi corpi proporzionale alla velocità angolare suggerisce un'altra ipotesi: che nelle tabelle sia sbagliato TU, che si basa sul moto di rotazione della Terra.

Ci spinge in questa direzione il fatto che con una sola correzione si mettono a posto tutte le osservazioni. Se invece si tentasse di ritoccare la legge di gravitazione universale, i risultati dei calcoli sarebbero diversi, e in modo complicato, per ogni diverso pianeta.

Ragionando come sopra abbiamo implicitamente ammesso che la seconda legge della dinamica

$$\vec{F} = m\,\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

sia incondizionatamente valida, e che il tempo che in essa compare sia perfettamente uniforme, per definizione. A noi serve però una definizione operativa; in altre parole, come si misura in pratica questo "tempo newtoniano"?

Per rispondere rovesciamo il discorso: osserviamo i pianeti, determiniamo λ_o e assumiamo come valida la legge di Newton (se si vuole con le correzioni relativistiche). Dovremo allora imporre $\lambda_t = \lambda_o$. Cerchiamo nelle effemeridi per quale valore di t la longitudine calcolata coincide con quella osservata; questo è il tempo nel dato istante di osservazione, che sarà in generale diverso dal TU per lo stesso istante (fig. G10–5).

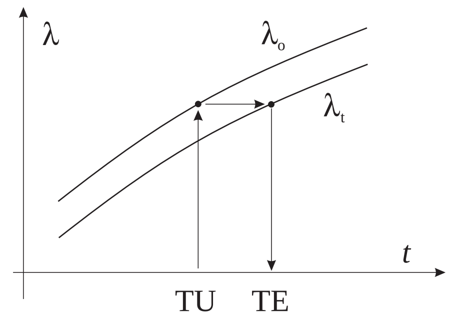

Fig. G10-5

Il tempo così definito, con il nome di *Tempo delle Effemeridi* (TE), fu introdotto in forma ufficiale nel 1960: l'origine di TE fu scelta in modo che risultasse TE = TU intorno al 1900; poi la differenza $\Delta T = \mathrm{TE} - \mathrm{TU}$ è andata progressivamente aumentando, e oggi supera il minuto.

Il Tempo Dinamico

Anche per motivi di chiarezza, a partire dal 1° Gennaio 1984 il TE ha assunto la denominazione generica di *Tempo Dinamico* (TD), con l'ulteriore distinzione tra *Tempo Dinamico Terrestre* (TDT) da utilizzare per osservazioni geocentriche (tempo proprio del riferimento solidale alla Terra), e *Tempo Dinamico Baricentrico* (TDB) quale coordinata temporale nelle equazioni del moto riferite al baricentro del sistema solare. La ragione fisica della differenza tra le due scale di tempo sta in effetti relativistici che discuteremo tra breve.

Le unità di tempo delle due scale sono scelte in modo che i due tempi coincidano mediamente in un anno. Come vedremo, la differenza TDB − TDT è puramente periodica, dipende principalmente dalla longitudine della Terra, e non supera 0.0017^{s}.

Correzioni relativistiche

Vogliamo ora mostrare come si possono calcolare, sia pure in modo approssimato, gli effetti relativistici che stanno alla base della distinzione tra TDB e TDT: studieremo perciò il comportamento di un orologio che percorra l'orbita della Terra. Trascureremo il campo gravitazionale di questa, la sua rotazione, la presenza della Luna, l'effetto degli altri pianeti... (Le correzioni dovute a tali fattori o sono costanti, o variabili ma di qualche ordine di grandezza inferiori a quella principale.)

Così facendo il problema diventa piuttosto semplice, sempre nel quadro della Relatività Generale: assumendo un sistema di coordinate polari $(t, r, \vartheta, \varphi)$, e indicando con M la massa del Sole, la metrica dello spazio-tempo si scrive (metrica di Schwarzschild):

$$d\tau^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) dt^2 - \frac{1}{c^2} \frac{dr^2}{1 - 2GM/c^2 r} - \frac{r^2}{c^2} \left(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta \, d\varphi^2\right). \qquad \text{(G10.3)}$$

La (G10.3) si riduce, per $r \to \infty$, all'ordinaria metrica di Lorentz–Minkowski scritta in coordinate polari: dunque t è il tempo di un orologio fermo a grande distanza dalla massa che genera il campo gravitazionale (e quindi la curvatura dello spazio-tempo). È ovvio che ϑ e φ hanno l'usuale significato di angoli polari, mentre a rigore r non è la distanza radiale, a causa del fattore che moltiplica dr^2. Fortunatamente per i nostri scopi il denominatore differisce assai poco da 1 ($2 \cdot 10^{-8}$ alla distanza della Terra) e questo ci consentirà notevoli semplificazioni.

Per studiare la marcia dell'orologio occorre solo inserire nella (G10.3) la legge oraria del suo moto, ossia del moto orbitale della Terra. Possiamo supporre che le coordinate siano state scelte in modo che $\vartheta = \pi/2$, e che sia inoltre $\varphi = 0$ al perielio; come vedremo studiando il problema dei due corpi, in meccanica newtoniana le espressioni che ci servono sono allora:

$$r = \frac{a\,(1 - e^2)}{1 + e\, \cos\varphi} \qquad \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\sqrt{GMa\,(1 - e^2)}}{r^2}. \qquad \text{(G10.4)}$$

(a è il semiasse ed $e = 0.0167$ è l'eccentricità dell'orbita della Terra).

Se conosciamo $r(t)$, $\varphi(t)$, la (G10.3) si scrive

$$d\tau^2 = \left[1 - \frac{2GM}{c^2 r} - \frac{1}{c^2} \frac{1}{1 - 2GM/c^2 r} \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - \frac{r^2}{c^2} \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\right] dt^2. \qquad \text{(G10.5)}$$

Possiamo usare le (G10.4) senza cambiamenti per il motivo già detto: vogliamo soltanto calcolare delle piccole correzioni, e le differenze fra le (G10.4) e le espressioni che ci darebbe il calcolo rigoroso sono dell'ordine di 10^{-8}. Faremo poi un'ulteriore approssimazione: trascureremo i termini di secondo ordine o superiore in e. Questa è un'approssimazione decisamente più grossolana, e fa sì che il risultato che otteremo sia buono solo entro qualche %.

In primo luogo si ha che dr/dt è di primo ordine in e (se l'orbita fosse circolare r sarebbe costante). Di conseguenza $(dr/dt)^2$ è di secondo ordine, e possiamo trascurarlo. Sostituiamo poi $d\varphi/dt$ dalla (G10.4) nella (G10.5), e troviamo:

$$\begin{aligned} d\tau^2 &= \left[1 - \frac{2GM}{c^2 a}\,(1 + e\,\cos\varphi) - \frac{GM}{c^2 a}\,(1 + 2e\,\cos\varphi)\right] dt^2 \\ &= \left(1 - \frac{3GM}{c^2 a} - \frac{4GM}{c^2 a}\, e\,\cos\varphi\right) dt^2 \\ d\tau &= \left(1 - \frac{3GM}{2c^2 a} - \frac{2GM}{c^2 a}\, e\,\cos\varphi\right) dt. \end{aligned}$$

Per integrare questa occorre introdurre $\varphi(t)$: per le solite ragioni possiamo trascurare l'eccentricità, e porre $\varphi = nt$, dove $n = \sqrt{GM/a^3}$ è il moto medio della Terra. Allora:

$$\begin{aligned}\tau &= \int\!\left(1 - \frac{3GM}{2c^2 a} - \frac{2GM}{c^2 a}\, e\, \cos nt\right) dt \\ &= \left(1 - \frac{3GM}{2c^2 a}\right) t - \frac{2GMe}{c^2 an}\, \sin nt.\end{aligned} \tag{G10.6}$$

La (G10.6) mostra che l'orologio che sta sulla Terra segna un tempo diverso da t per due ragioni:

- Una differenza costante di marcia, espressa dal fattore che moltiplica t. Questa però può essere eliminata ridefinendo l'unità di tempo, ossia regolando diversamente l'orologio.
- Una differenza periodica, data dal secondo termine. Si tratta di un effetto col periodo di un anno e la cui ampiezza vale

$$\frac{2GMe}{c^2 an} \simeq 1.7 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{s}.$$

Tutti gli altri effetti trascurati, sommati insieme, non arrivano a 10^{-4} s.

Tempo Atomico e Tempo Universale Coordinato

Il primo orologio atomico è stato costruito nel 1955 (*Essen*). Solo nel 1972 il tempo atomico è però divenuto la scala ufficiale di tempo, in fisica e in astronomia. La base del tempo atomico è una rete di orologi, situati in diversi paesi, e che nel loro insieme definiscono il *Tempo Atomico Internazionale* (TAI). La corrispondente unità di tempo è il secondo del Sistema Internazionale:

> il secondo del SI è pari a 9 192 631 770 periodi della radiazione emessa nella transizione fra i livelli iperfini $F = 4$, $M = 0$ e $F = 3$, $M = 0$ dello stato fondamentale dell'atomo di $^{133}\mathrm{Cs}$.

La relazione col Tempo Dinamico è stabilita dalla convenzione

$$\mathrm{TDT} = \mathrm{TAI} + 32.184\,\mathrm{s}.$$

Anche per l'uso civile, dal 1972 tutti i segnali orari sono derivati dal Tempo Atomico; ma per evitare la progressiva deriva dovuta alla non uniformità della rotazione terrestre e conseguentemente del TU, si è definito il *Tempo Universale Coordinato* (TUC) che corrisponde al Tempo Atomico salvo per correzioni consistenti nell'inserzione di un secondo supplementare alla mezzanotte del 1° Gennaio e del 1° Luglio, quando necessario, in modo che il modulo della differenza tra TU e TUC non superi mai 0.9 s: ne segue che la differenza $\Delta\mathrm{AT} = \mathrm{TAI} - \mathrm{TUC}$ è sempre un numero intero di secondi.

L'adozione del Tempo Atomico come tempo campione è stata una rottura d'importanza storica con la tradizione millenaria secondo cui il tempo era misurato da osservazioni astronomiche. In particolare, si è ribaltata la concezione adottata col Tempo delle Effemeridi, secondo cui il tempo ricavato dal moto dei pianeti era uniforme *per definizione*. Tuttavia il problema dell'uniformità di una scala di tempo si ripropone sempre, e oggi assume la forma seguente. Il TAI è ricavato da fenomeni a scala atomica: in astronomia lo impieghiamo per confrontare la teoria con le osservazioni sul moto dei pianeti, o magari per studiare la rotazione delle pulsar. Chi ci garantisce che anche a questa scala il TAI sia una buona scala di tempo? In altre parole: potrebbero esserci deviazioni sistematiche tra il tempo che descrive i fenomeni atomici e quello che entra in gioco quando dominano interazioni gravitazionali?

Un'altra possibile versione dello stesso problema è questa: siamo certi che la costante G di gravitazione sia davvero costante? In anni recenti sono state condotte ricerche su questo problema, e vi sono stati annunci di possibili deviazioni; gli annunci non sono stati però confermati. Possiamo quindi concludere che il problema è aperto dal punto di vista di principio, ma per tutto quanto sappiamo fino ad oggi si può davvero parlare di un'unica scala di tempo valida per tutta la fisica.