

# LA TERRA È UN OROLOGIO IRREGOLARE

Il moto della Terra, un tempo considerato così uniforme e perfetto da servire per la misura del tempo, si rivela invece sempre più irregolare man mano che si affina la nostra tecnica. Già gli orologi degli osservatori astronomici sono più precisi della Terra e misurano le fluttuazioni del suo moto, sicché molti scienziati pensano di adottare per unità di tempo una grandezza che non sia legata al moto diurno o annuo del nostro pianeta, ricorrendo a fenomeni fisici di durata rigorosamente immutabile.



Un orologio solare 1902 (diametro 1.600 cm, altezza totale 1 m).

**L**E GRANDEZZE fondamentali della fisica, quelle che servono di base per stabilire un sistema di unità, sono, come è noto, la lunghezza, la massa e il tempo. Per le due prime si dispone di campioni, con i quali è possibile confrontare altre lunghezze o altre masse. Ma per il tempo il campione non esiste: l'unità di tempo viene infatti definita attraverso la rotazione della Terra. Ora, possiamo essere certi che il tempo così misurato sia conforme alla nozione intuitiva che ne abbiamo, vale a dire che scorra in modo rigorosamente uniforme? In altri termini, quale certezza abbiamo che il moto della Terra sia di una regolarità perfetta?

## La misura del tempo

Per studiare questo problema fondamentale, richiameremo i principi della misura del tempo.

In teoria si può scegliere come riferimento il centro del Sole, o una stella, o un altro punto qualsiasi, e definire il giorno come l'intervallo tra due passaggi successivi di quel punto al meridiano di un luogo dato.

Se si sceglie il Sole, il giorno così definito si chiama *giorno solare vero*. Esso presenta l'inconveniente di avere durata variabile, perché il moto apparente del Sole intorno alla Terra non è uniforme. Ad esempio il giorno solare vero è più lungo di 30 sec intorno alla metà del mese di dicembre che non a metà del mese di settembre; già un buon orologio dà un'ora più esatta. Due cause contribuiscono a quell'effetto: il Sole non si trova nel piano dell'equatore della Terra; il suo

moto apparente si compie nel piano dell'*eclittica*, inclinato di  $23\frac{1}{2}^\circ$  all'incirca rispetto al piano dell'equatore; inoltre l'orbita della Terra intorno al Sole non è circolare, ma lievemente ellittica.

Per definire il *tempo solare medio*, che serve a regolare i nostri orologi, si immagina quindi un sole medio fittizio tale che si sposti uniformemente, all'equatore, con moto uguale al moto medio del Sole stesso. Il Sole vero è in ritardo di  $16\frac{1}{2}$  minuti all'incirca sul Sole medio intorno al 3 novembre; al contrario è in anticipo di  $14\frac{1}{2}$  minuti intorno al 12 febbraio.

## Il tempo siderico

Ma, in pratica, l'ora viene determinata con osservazioni stellari. Il tempo compreso tra due passaggi consecutivi di una stessa stella al meridiano di un luogo, che misura quindi il vero periodo di rotazione della Terra rispetto alle stelle, viene chiamato *giorno siderico*. Esso è più breve di 4 min all'incirca rispetto al giorno solare medio perché, mentre compie un giro su se stessa (ossia  $360^\circ$ ), la Terra si sposta rispetto al Sole di  $1^\circ$  all'incirca sulla sua orbita; la Terra si sposta quindi di  $360^\circ$  durante un giorno solare medio.

In modo rigoroso, non si definisce neppure il tempo siderico mediante il passaggio di una stella, bensì con quello di un certo punto particolare, il cosiddetto *punto gamma*, o *punto vernale*, che è il punto del cielo in cui l'eclittica taglia l'equatore celeste quando lo attraversa da sud a nord. Non essendo questo punto gamma rigorosamente fisso rispetto all'insieme delle stelle, questa scel-



◀ Spostamento delle stelle durante la notte. Beninteso esse non descrivono un cerchio completo. I cerchi che si vedono provengono dalla sovrapposizione apparente di orbite di varie stelle. Le grandezze di queste sono molto diverse tra loro.

ta appare sorprendente, ma essa è dovuta a varie ragioni pratiche, tra l'altro alla necessità di convertire il tempo sidero in tempo medio.

Due sono le cause che producono lo spostamento del punto gamma. La prima, dagli astronomi chiamata *precessione degli equinozi*, dipende dal moto dell'asse terrestre che, invece di rimanere costantemente parallelo a se stesso, descrive lentamente un cono; esso dà luogo ad uno spostamento del punto gamma sull'eclittica di 50 secondi d'arco l'anno all'incirca, e si manifesta nel fatto che il giorno sidero definito dal punto gamma è più breve di 0,009 sec rispetto al periodo reale di rotazione della Terra. In secondo luogo, al moto di precessione dell'asse terrestre si aggiunge anche un brevissimo moto di oscillazione o nutazione, dovuto alle perturbazioni prodotte dal Sole e dalla Luna; per questo il tempo sidero non scorre in modo rigorosamente uniforme, ossia il giorno sidero non ha durata costante. Si chiama quindi *tempo sidero apparente* quello che corrisponde al punto gamma, e si definisce poi un *tempo sidero medio*, calcolato in modo che ciascun giorno abbia la stessa durata.

Beninteso non si determina l'ora osservando il passaggio al meridiano del punto gamma stesso, che non è contrassegnato nel cielo da nessun se-

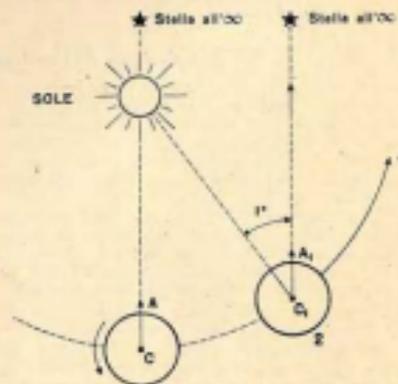
gno particolare. Ma gli astronomi sogliono scegliere questo punto gamma come, origine delle coordinate alle quali riferiscono le posizioni relative degli astri; essi tengono evidentemente conto delle correzioni dovute ai moti di precessione e di nutazione ai quali abbiamo accennato sopra. Invece di osservare il passaggio del punto gamma, si può quindi osservare il passaggio di una stella, di cui sia nota la posizione rispetto al punto gamma. Per diminuire l'influenza degli errori d'osservazione, si ripete durante una notte la stessa operazione su 15-20 stelle; l'ora risulta così determinata con l'approssimazione di 2-3 millesimi di secondo.

Gli astronomi usano ora il tempo sidero medio, oia il tempo solare medio e possono, con facili calcoli, passare agevolmente dall'uno all'altro. Il quesito che ora esamineremo è però di sapere se queste unità siano veramente costanti o no.

### La rotazione della Terra va lentamente rallentando

Per molto tempo è stata ammessa senza discussione la perfetta regolarità della rotazione della Terra. Quando si osservava che il moto di un orologio non concordava esattamente con le osservazioni dei passaggi di stelle, si attribuiva la differenza non ad una variazione della durata della rotazione terrestre, bensì al funzionamento dell'orologio, poiché si sapeva come quest'ultimo non fosse perfetto, tra l'altro per i difetti dei meccanismi che lo compongono.

Vedremo che si dispone oggi di orologi di regolarità maggiore di quella dell'orologio-Terra.



IL TEMPO SIDERO

Il giorno sidero, che è il tempo compreso tra due passaggi successivi di una stessa stella al meridiano di un luogo, è più breve del giorno solare medio, tempo compreso tra due passaggi al meridiano delle stesse stelle, del centro di un Sole medio teorico. La Terra si sposta rispetto al Sole di 1° all'incirca sulla sua orbita mentre compie un giro completo su se stessa (360°). Questa traslazione produce all'incirca 4 min di differenza tra il giorno sidero e il giorno solare medio.

Ma molto tempo prima che fossero stati costruiti affetti orologi, erano già stati poste chiaramente in evidenza alcune variazioni nella durata della rotazione terrestre.

Già alla fine del Seicento l'astronomo Halley notò che se si confrontavano le posizioni della Luna risultanti da osservazioni recenti con quelle dedotte dalle eclissi di Sole o di Luna osservate in passato, ne risultava l'esistenza di un'accelerazione anomala della Luna: quando, al momento delle eclissi, il nostro satellite viene ad allinearsi sulla retta che congiunge la Terra col Sole, esso vi giunge sempre più in anticipo rispetto alle posizioni calcolate nell'ipotesi di un tempo uniforme; il suo moto sembra quindi accelerarsi nel corso dei secoli. In realtà il calcolo è assai complesso, poiché occorre tener conto delle attrazioni del Sole, della Terra e anche dei pianeti, i quali, nonostante le masse relativamente piccole e le grandi distanze, esercitano anch'essi un'azione non trascurabile. La maggior parte dei grandi matematici, da Newton in poi, hanno recato il loro contributo alla risoluzione di quel problema, ma apparse a poco a poco che, nonostante questi perfezionamenti, la teoria del moto della Luna non giustificava l'accelerazione osservata, e che la sola spiegazione possibile di quella discrepanza era un progressivo rallentamento della rotazione della Terra.

Il ritardo corrispondente è all'incirca di 17 secondi di tempo per secolo, trascurabile quindi agli effetti della misura del tempo, anche col grado di precisione oggi raggiunto. Ma per periodi lunghissimi l'effetto si accumula e raggiunge parecchie ore per un'eclissi di Sole o di Luna osservata 2000 anni fa. Nonostante la scarsa precisione delle misure degli antichi, si comprende ch'esse siano sufficienti per non lasciare alcun dubbio sull'esistenza di una siffatta differenza.

### L'azione delle maree

D'altra parte questo rallentamento della rotazione terrestre non è del tutto sorprendente; era stato anzi previsto come possibile prima di essere effettivamente rivelato. Esso è dovuto principalmente all'attrito prodotto dalle maree. Queste formano infatti intorno alla Terra una specie di sigonifamento, la cui posizione è determinata dall'attrazione del Sole e della Luna, e che non dipende dalla rotazione della Terra. Il moto incessante delle acque sul fondo degli oceani, in senso inverso alla rotazione della Terra, deve quindi frenare quest'ultima.

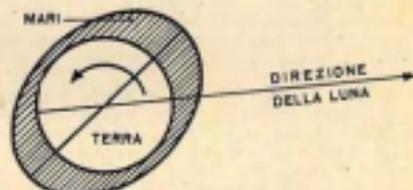
Se l'idea appare naturale, è stato però alquanto ardu darle una base quantitativa. Si calcola agevolmente il valore del frenamento corrispondente al rallentamento osservato; esso viene valutato in una potenza dell'ordine di 2 miliardi di cavalli. Ma quale è, di questo valore totale, la parte che spetta alle maree? Jeffrey, che tra gli altri ha studiato questo problema, stima che l'attrito nel mezzo degli oceani sia relativamente trascurabile, ma non è lo stesso nei mari stretti e poco profondi: in base ai dati oceanografici attuali, il frenamento delle maree in quei mari salirebbe al 60% almeno dei 2 miliardi di cavalli accen-

nati, e da solo lo stretto di Behring ne provocherebbe i due terzi. La spiegazione viene considerata come soddisfacente, ma non si può sperare un accordo rigoroso in un problema complesso come questo.

Poiché il frenamento della rotazione terrestre per azione delle maree ha, come abbiamo detto, effetto secolare, il fenomeno riveste grande importanza dal punto di vista cosmico. Il giorno continuerà infatti sempre ad allungarsi finché si arriverà ad un momento in cui la Terra presenterà sempre la stessa faccia alla Luna, che come è noto si comporta già così rispetto alla Terra. È stato calcolato che la durata di un giorno raggiungerà allora 47 dei nostri giorni attuali.

### Fluttuazioni irregolari della rotazione terrestre

Se l'accelerazione apparente del moto della Luna dipende dal rallentamento graduale della rotazione terrestre, anche gli altri astri dovranno trovarsi in anticipo sulla loro orbita rispetto alle posizioni calcolate.

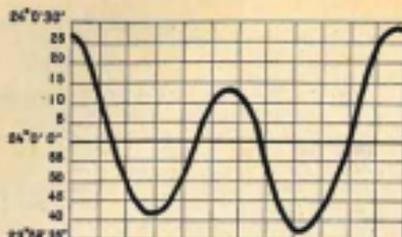


● I mari del globo subiscono un'attrazione da parte del Sole e della Luna che, dipendendo soltanto dalla posizione di questi astri, si oppone alla rotazione terrestre, producendo un attrito continuo delle maree sul fondo di tutti gli oceani.

Le osservazioni hanno infatti confermato questa previsione. La divergenza rispetto ad un tempo uniforme è stata riconosciuta anzitutto per la Luna, perché quest'astro ha un moto angolare assai più veloce del Sole e dei pianeti. Ma un esame minuzioso, che ha richiesto un lavoro ingente, ha anche dimostrato un'accelerazione apparente nel moto di questi ultimi, o per lo meno questa accelerazione è stata riconosciuta nel caso del Sole e dei pianeti più rapidi e più vicini al Sole, come Mercurio e Venere.

Ma le osservazioni hanno anche posto in evidenza un altro effetto. Misurando gli istanti in cui avvengono le occultazioni di stelle per la Luna, ossia la loro scomparsa dietro il disco della Luna, è stato accertato, in base ai risultati raccolti fin dal Seicento, che all'accelerazione progressiva del moto della Luna si sovrappongono altre piccole fluttuazioni: rispetto alle posizioni previste, la Luna può infatti trovarsi in anticipo o in ritardo di quantità che raggiungono i 15 secondi d'arco, corrispondenti a 30 secondi di tempo.

È stato possibile affermare che queste differen-



Sec. feb. Mar. Apr. Mag. Giug. lug. Ag. Sett. Ott. Nov. Dic.

● Variazioni della durata del giorno solare vero, dovute ai vari fattori che influiscono sulla rotazione della Terra, producendo effetti complicati.

ze avevano per causa l'irregolarità della rotazione terrestre, soltanto quando si ebbe la certezza che la teoria del moto della Luna non aveva trascurato alcun fattore, e che inoltre la teoria della relatività non poteva spiegare le irregolarità osservate. Inoltre, come per il caso dell'accelerazione secolare, una conferma è stata recata dall'osservazione di discordanze analoghe nel moto di altri corpi celesti.

Non si può dire per ora se quelle variazioni siano improvvise oppure richiedano per prodursi alcune settimane, vari mesi o addirittura molti anni. Esse corrispondono a variazioni nel momento d'inerzia della Terra; ma da che cosa dipendono queste variazioni? Tra l'altro da modificazioni del raggio terrestre (dell'ordine di pochi decimetri soltanto).

### Le variazioni stagionali

Le variazioni della rotazione terrestre, delle quali abbiamo parlato finora, erano state riconosciute già da tempo confrontando il moto della Luna e quello dei pianeti. Ma da una ventina d'anni il problema ha mutato aspetto, poichè si costruiscono ora orologi astronomici il cui andamento è, per intervalli dell'ordine di un anno, certamente più regolare della rotazione terrestre. È diventato così possibile rivelare certe fluttuazioni a breve periodo confrontando direttamente il moto della Terra col tempo segnato da questi orologi astronomici.

Sono già notevoli gli straordinari progressi conseguiti nella tecnica degli orologi comuni, o orologi a pendolo, nei quali è stato possibile ridurre l'errore di marcia a meno di un millesimo di secondo al giorno. Ma i progressi più sorprendenti riguardano gli orologi che sfruttano gli effetti piezoelettrici del quarzo (1).

Nel 1937 N. Stoyko, Capo del Servizio cecario all'Osservatorio di Parigi, scopri le prime prove delle fluttuazioni stagionali nella rotazione ter-

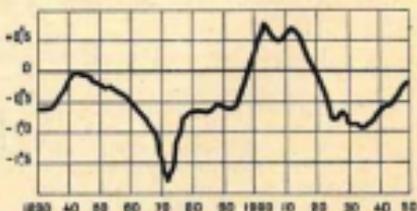
stre. Confrontando i tempi degli orologi fondamentali di vari Osservatori (orologi a pendolo di Parigi e Washington, orologio a quarzo di Berlino-Charlottenburg) egli osservò che questi orologi erano in sensibile anticipo o ritardo per le medesime quantità, e che i loro andamenti mostravano una periodicità annua nettissima. Siccome l'andamento degli orologi viene determinata mediante osservazioni di passaggi di stelle al meridiano, egli pensò che le differenze riscontrate avessero per causa non le imperfezioni degli orologi stessi, ma proprio le disuguaglianze nella durata di rotazione della Terra.

Le misure proseguite durante questi ultimi anni e in particolare gli studi indipendenti sull'andamento degli orologi a quarzo entrati in servizio in vari Osservatori, hanno confermato quella scoperta; è oggi assodato che la Terra gira meno presto in primavera e più presto in autunno. La durata del giorno varia solo di un millesimo di secondo in più o in meno; sembra quindi sorprendente che sia stato possibile mettere in luce variazioni così minime. Ma per il loro effetto secolare, la rotazione della Terra ritarda, rispetto al tempo uniforme, di 6 centesimi di secondo nel maggio-giugno, e anticipa di 5 centesimi di secondo nel novembre.

È verosimile che questa variazione annua sia dovuta a movimenti stagionali di materia alla superficie della Terra; per cercare di precisare meglio questi movimenti sono state avanzate varie ipotesi. Alcune fra le azioni proposte paiono troppo deboli, ad esempio la fusione estiva dei ghiacci nelle zone polari, o l'accumulazione invernale delle nevi sui continenti. Ma è stato calcolato che gli spostamenti stagionali delle masse d'aria producono variazioni della pressione atmosferica, che basterebbero a spiegare in buona parte gli effetti osservati. Comunque il problema non può dirsi ancora chiarito.

### Nuova definizione dell'unità di tempo

Se le irregolarità della rotazione terrestre non hanno conseguenze nella nostra vita quotidiana, esse ne hanno però non soltanto per l'astronomia, ma anche per tutte le applicazioni scientifiche nelle quali compare la misura del tempo. In sostanza, la durata di quella rotazione può essere considerata costante solo con un'approssimazio-



● La rotazione della terra, pur rallentandosi gradualmente, è soggetta a variazioni irregolari di velocità. Ecco quelle osservate dall'anno 1830 in poi.

(1) È anche noto che è stata costruita un orologio, impropriamente chiamato atomico, nel quale il moto è controllato dalle vibrazioni di una molecola, e con il quale si spera di raggiungere una precisione mai realizzata finora.

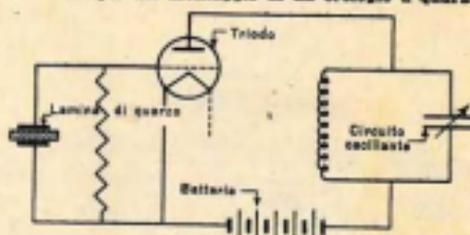
## TRASMETTITORE BELIN (UFFICIO INTERNAZIONALE DELL'ORA)



### I SEGNALI ORARIO

Lo schema dei segnali da trasmettere viene inciso in nero su bianco su un cilindro che ruota a velocità costante, perché sincronizzato dalla corrente a 1000 periodi di un orologio a quarzo. (a destra). Un sistema fotoelettrico esplora il detto schema durante la trasmissione. I segnali vengono emessi direttamente dai segni incisi sul cilindro, ma il loro inizio è prodotto dal brevissimo tep di un orologio alimentato dalla stessa corrente a 1000 periodi; i tratti neri mantengono l'emissione del segnale soltanto per la durata necessaria.

### Principio del montaggio di un orologio a quarzo



ne di 1/100 di secondo e ciò mette in evidenza la necessità di una nuova unità di tempo, meglio definita. D'altronde varie applicazioni, come la costruzione di campioni di frequenza in radio-tecnica, fanno già sentire quel bisogno.

Può darsi che in avvenire venga definita l'unità di tempo con metodi che non si riferiscono più ai moti della Terra, ad esempio mediante la propagazione di un raggio luminoso su una distanza ben definita, o con la durata di una vibrazione in una molecola. Ma per il momento una decisione di questo genere appare per lo meno prematura. Durante una conferenza internazionale sulle costanti astronomiche, tenuta all'Osservatorio di Parigi nel marzo del 1950, diciannove specialisti hanno proposto l'adozione di

una definizione basata sulla durata dell'anno sidero 1900 che, secondo le misure di Newcomb, è uguale a 365.25636174 giorni solari medii, ossia a 31.558.149.741 secondi. Una decisione definitiva verrà presa in occasione di prossimi congressi.

Così l'unità di tempo non sarebbe più legata alla rotazione della Terra, ormai riconosciuta variabile, ma alla durata di una delle sue rivoluzioni intorno al Sole. Si ha ogni ragione di credere che il tempo così definito corrisponderà a quello che figura nelle equazioni della meccanica celeste, o, come si dice, al tempo newtoniano. Ma l'esperienza ha fatto gli astronomi prudenti, tanto che essi propongono di dare, almeno in via provvisoria, al nuovo tempo l'appellativo più modesto di tempo delle effermeridi.