

# Insegnare relatività nel XXI secolo

*Tempo*  
*e*  
*orologi*

## Premessa

Il tempo della fisica non è quella cosa misteriosa dell'intuizione comune, e anche della filosofia.

Per un fisico parlare di tempo significa parlare dei suoi *metodi di misura*.

Se si vuole trattare di fisica e in particolare di relatività, bisogna dedicare un po' di ... spazio al tempo e alla metrologia del tempo, che invece è spesso un argomento trascurato.

## **Breve storia del tempo**

La preistoria del tempo comincia con la distinzione tra il giorno e la notte, con l'associazione dei mesi alla Luna e dell'anno alle stagioni.

Il mese nasce dalle fasi della Luna; l'anno dall'alternanza delle stagioni, e anche dall'alternarsi delle costellazioni visibili nel cielo notturno.

## Strumenti di misura del tempo

Si comincia con gli orologi solari (meridiane).

Gli orologi solari hanno una serie di caratteristiche che oggi ce li fanno considerare assolutamente inadeguati.

In primo luogo permettono di apprezzare al massimo il minuto, a causa della *sfumatura* dell'ombra.

Un difetto più grave della meridiana è che nel corso di un anno essa in certi momenti è *avanti*, in altri è *indietro* rispetto al tempo segnato da un orologio di quelli usuali.

La differenza può arrivare a circa *un quarto d'ora*.

## **Come si fa a sapere che una meridiana va avanti o indietro?**

La si deve confrontare con un orologio *migliore*, che non abbia anch'esso delle fluttuazioni.

Quindi anche a questo livello così primitivo nasce immediatamente il problema: che cosa significa che un orologio è “migliore” di un altro? Che cosa significa che *va bene* o *non va bene*?

Occorre insistere su questi problemi, perché in relatività gli orologi si comportano in modo strano...

Se uno non ha capito bene che cosa s'intende quando si dice che di un certo orologio ci si può fidare, come potrà farsi idee chiare sugli effetti relativistici?

## Il Tempo Siderale e il Tempo Universale

Si è deciso che un orologio migliore della meridiana era la rotazione terrestre *rispetto alle stelle*.

Di fatto si misura la rotazione terrestre, in base al sorgere e al tramontare delle varie stelle durante la notte; questo è il punto di partenza del concetto di *tempo siderale* (TS).

Più esattamente, si usa il *passaggio al meridiano*.

Usare il TS equivale a considerare la *Terra*, nel suo moto rotatorio rispetto alle stelle, come la *lancetta di un orologio*.

Però nell'uso quotidiano il TS non è pratico, e si usa il *tempo solare medio* (TSM), che viene calcolato a partire dal TS per mezzo di una certa formula (complicata, e che qui non riporto).

Il TSM, se riferito non al meridiano locale o ad altri meridiani, ma al *meridiano di Greenwich*, prende il nome di *tempo universale* (TU).

Una volta si chiamava *tempo medio di Greenwich* (TMG, GMT).

## La Terra è un buon orologio?

Abbiamo dunque deciso che l'orologio è la Terra.

Ma la Terra è un buon orologio?

Abbiamo tutto il diritto di porci questa domanda, che si può subito riformulare così: la rotazione terrestre è *veramente uniforme*?

Potremmo porci anche una domanda più profonda: uniforme *rispetto a che*? Risposta: “rispetto al tempo, quello vero”.

**Ma chi ha il tempo, quello vero?**

Dietro a questo modo di esprimersi c'è la *fisica newtoniana*, nella quale il tempo è quella cosa che scorre uniformemente, ecc.

Per dirla con Newton, nei Principia:

*in sé e per sua natura, senza relazione ad alcunché di esterno,  
scorre uniformemente.*

Una volta assunto questo quadro concettuale, ha senso domandarsi se la Terra ruota uniformemente: rispetto al tempo assoluto newtoniano.

## Variazioni periodiche e secolari

La rotazione terrestre ha due tipi di irregolarità, grosso modo: le irregolarità *periodiche* e quelle *secolari*.

Il termine “secolari” è preso dal gergo astronomico: si usa per gli effetti che *si accumulano* nel tempo.

L'entità delle fluttuazioni periodiche è piccola: sono dell'ordine del *centesimo di secondo*.

Non nel senso che il periodo di rotazione cambi di centesimi di secondo: solo in capo a tempi di alcuni mesi *si trova l'orologio Terra alternativamente avanti o indietro* di centesimi di secondo.

Ecco i dati sulle *variazioni secolari*.

Nel corso di un secolo la rotazione terrestre è andata progressivamente *ral-  
lentando*, con fluttuazioni irregolari.

Il ritardo cumulativo è di *oltre un minuto*, dove questo — al solito — non vuol dire che ora il periodo di rotazione è di un minuto più lungo di quello che era un secolo fa.

Significa che a forza di rallentare l'orologio Terra è rimasto cumulativa-  
mente sempre più indietro, e *il ritardo ha superato un minuto*.

## Orologi migliori della Terra

Per avere la prova che la Terra non è un orologio perfetto, occorreva disporre di *orologi migliori*.

Questo è stato possibile solo *da poco più di 70 anni*.

Fino allora, i migliori orologi disponibili erano gli *orologi a pendolo*.

Per quanto fossero stati perfezionati, non erano sufficientemente sensibili e stabili: qualche indicazione l'avevano data, ma non conclusiva.

La prova sicura venne con l'adozione di due nuove specie di “orologi”:

- 1) il *moto della Luna e dei pianeti*: invece di usare come orologio la rotazione della Terra, si usa il moto dei corpi del sistema solare;
- 2) gli *orologi a quarzo*.

Gli orologi a quarzo vanno bene solo per mostrare che la rotazione della Terra ha delle *variazioni periodiche*: accelera e rallenta.

Non sono buoni per verificare l'effetto di rallentamento secolare, perché *non sono affidabili su tempi lunghi*.

## Perché ci fidiamo degli orologi a quarzo?

Solito problema: se vediamo una discordanza tra la rotazione terrestre e gli orologi a quarzo, *chi ci dice che la colpa è della Terra?*

La risposta sta nel plurale: *gli* orologi.

Gli orologi al quarzo non sono uno solo: ogni laboratorio si fa il suo.

Sono costruiti da *fabbricanti diversi*, in *laboratori diversi*, sono *uno diverso dall'altro*.

Se fossero costruiti tutti uguali si potrebbe forse capire come mai vanno d'accordo tra loro, anche se non sono “giusti”.

Ma sono diversi e situati in luoghi diversi: non è pensabile che tutte *le influenze esterne*, che certamente ci sono, siano *uguali* per i diversi orologi.

Perciò se vediamo che tutti questi orologi concordano tra loro ben più di quanto concordino con la rotazione terrestre, la spiegazione è ovvia: è la Terra che *non ruota uniformemente*.

## Il Tempo delle Effemeridi

Col moto del sistema solare si definisce il *tempo delle effemeridi* (TE), che nel 1955 sostituì il TS come base astronomica del tempo.

Usare il moto dei corpi celesti non è cosa semplice, perché i pianeti e la Luna *non hanno moti regolari e uniformi*.

Il metodo comunque è il seguente.

Un'*effemeride* è una tabella che dà la *posizione* di un pianeta *in funzione del tempo*.

*Si usa la tabella* non per ricavarne la posizione di un pianeta dato il tempo, ma *inversamente*: si guarda il pianeta (se ne determina la posizione) e da questa, per confronto con l'effemeride, si ricava il tempo.

Si tratta di un metodo scomodo e complicato: richiede tutta una serie di *osservazioni* raffinate, un apparato di *calcoli*...

A parte la scomodità pratica del TE, nasce lo stesso problema: chi ci dice che il tempo ricavato dai pianeti sia *uniforme*?

## Il Tempo Atomico

Dal 1967 il tempo campione è dato dagli orologi atomici al Cesio 133.

Ho detto “gli” orologi perché naturalmente *non ce n'è uno solo*: ce ne sono tanti, *in contatto radio* tra di loro, e vanno d'accordo; il che ci fa stare tranquilli sulla loro affidabilità.

Così *l'astronomia ha perso il privilegio*, che aveva da millenni, *della determinazione del tempo*, e il tempo è diventato ormai un affare di *fisici ed elettronici*.

## Gli effetti relativistici

Dal 1964 gli astronomi si sono rassegnati a tenere conto degli *effetti relativistici* sul tempo nello studio del moto dei pianeti.

La Terra gira intorno al Sole, e *la sua velocità varia* (perché l'orbita è ellittica); inoltre *cambia la distanza* dal Sole.

Entrambi questi fatti provocano effetti relativistici, per cui *un orologio sulla Terra e uno in orbita circolare non vanno d'accordo*.

La differenza varia nel corso dell'anno, ma *non supera i due millisecondi*.

Tuttavia la precisione delle osservazioni è tale che bisogna tenerne conto.

## Un problema aperto: $TA = TE$ ?

Visto che dal 1967 il campione di tempo è il TA, nasce il problema: ma TE e TA sono *lo stesso tempo*?

Questo problema è ancora oggetto di ricerca.

La cosa importante è che su questo si può fare *un'indagine fisica*: non è un problema metafisico.

Da una parte ci sono gli *orologi atomici*, dall'altra c'è il *sistema solare*.

La domanda è: i due tempi *vanno d'accordo*?

Per ora non si sono viste differenze; ma in linea di principio le osservazioni *potrebbero dare un risultato diverso*.

## Gli orologi atomici

Occorre sottolineare che l'orologio atomico è uno *strumento fisico*, costituito di certi componenti, e che funziona secondo certe leggi.

La definizione del secondo nel Sistema Internazionale è oggi la seguente:

**9192631770 cicli della transizione iperfina del  $^{133}\text{Cs}$ .**

(La definizione non è del tutto precisa, ma può bastare per i nostri scopi.)

## Perché sono importanti gli orologi atomici?

Ci sono due ragioni.

- Perché sono *i migliori* che abbiamo: sono pochissimo sensibili alle influenze esterne.
- Perché sono *assoluti*.

Il funzionamento degli orologi atomici idealmente dipende solo dalle proprietà degli atomi, che sono *tutti identici*, indipendentemente dal tempo e dal luogo.

Per cui ogni orologio, per conto proprio, è già un *campione di frequenza*.

Prenderemo quindi l'orologio atomico come *paradigma di orologio ideale*, nel senso che quando parleremo di orologi ideali, potrete visualizzarli come orologi atomici.

## Orologi = strumenti

Ripeto: nell'insegnamento della fisica è necessario dedicare spazio agli orologi perché bisogna *togliere al tempo quell'aura metafisica* che si porta dietro.

Il tempo dal punto di vista di un fisico non è una cosa speciale; è una grandezza che *si misura con strumenti* che si chiamano *orologi*.

Sono *strumenti di misura*: come tali possono essere più o meno buoni, più o meno affidabili, come qualunque altro strumento di misura: come un termometro, come un amperometro.

Sono qualcosa di *reale*, che è stato *fabbricato* da qualcuno che sa fare quelle cose.

Funzionano più o meno bene a seconda della bravura chi li ha costruiti.

Anche in questo non hanno niente di diverso da qualunque altro strumento della fisica.

Dall'orologio ad acqua all'orologio atomico, tutti hanno qualche principio fisico alla base del loro funzionamento, molto diversi uno dall'altro.

Chi vuol sapere come funziona un orologio deve capire qual è il suo *principio di funzionamento*.

Sono soggetti a *perturbazioni esterne* (temperatura, pressione, campi elettrici, magnetici, accelerazioni, ecc.).

Se non sono assoluti devono essere *tarati*.

Un orologio ideale *non dovrebbe richiedere taratura*: dovrebbe avere “scritta dentro” la sua frequenza di funzionamento, in modo che non ci si debba preoccupare di metterlo d'accordo con qualcos'altro.

Poi dovrebbe essere *libero da influenze esterne*.

## Orologio assoluto non significa tempo assoluto

Qui bisogna fare attenzione: il fatto che ora abbiamo un orologio assoluto, *non ha niente a che vedere* col carattere assoluto del tempo.

Cosa sia un orologio assoluto, l'abbiamo detto: è uno che non ha bisogno di *taratura*.

Tempo assoluto invece ... lo discuteremo subito; ma è proprio la disponibilità di orologi assoluti che ci permette facilmente di porci il problema *sperimentale* se il tempo sia o no assoluto.

Il punto di partenza è la frase di Newton già detta:

*... in sé e per sua natura, senza relazione ad alcunché di esterno,  
scorre uniformemente.*

Nella cultura del '6-'700 una tale concezione è del tutto naturale; ma essa fa così profondamente parte della nostra cultura, ad ogni livello, che ancor oggi ci riesce difficile accettare che le cose possano andare altrimenti.

E invece quando ci mettiamo a parlare di relatività, una tale visione del tempo dobbiamo *rimetterla in discussione*.

Per far questo in modo consapevole, è necessaria una riflessione sul fatto che l'idea del tempo assoluto ce l'abbiamo *ben radicata* dentro di noi.

## La matematizzazione del tempo

Il tempo della fisica newtoniana viene identificato con la *retta reale orientata*.

Nella meccanica newtoniana il tempo è rappresentato con un *numero reale*; quando il tempo passa, ci spostiamo verso destra sulla retta dei numeri reali (asse dei tempi = asse delle ascisse, ecc.)

Ma questo è il risultato di una *decisione*: a un certo punto decidiamo che la struttura matematica adatta per descrivere il fatto fisico che chiamiamo “tempo” è proprio quella.

Occorre aver chiaro che non si tratta di un “a priori”, e tanto meno di un fatto scontato: è una *decisione consapevole*.

In generale, quando abbiamo di fronte un complesso di fatti fisici, noi scegliamo di descriverli con una certa *struttura matematica*.

Per quel che riguarda il tempo, decidiamo — in base all'esperienza, in base alle leggi fisiche che conosciamo, in base a ciò che ci torna utile — che il tempo è correttamente descritto dalla *retta reale*.

Con ciò stesso si fanno una serie di *asserzioni*: si attribuiscono al tempo della fisica una serie di *proprietà*.

Si asserisce che per il tempo valgono tutte le proprietà della retta reale matematica: queste, che sono proprietà matematiche, *si traducono in proprietà fisiche* che dovrebbero avere un corrispettivo negli *strumenti* e nelle *misure*.

## Estrapolazioni

Abbiamo costruito una fisica, la *meccanica newtoniana*, che si basa su quest'idea del tempo; quella fisica ha rappresentato bene *tutti i fatti conosciuti* (solo i fatti conosciuti, però).

Molto tempo dopo si comincia a parlare di *cosmologia*: si sta estrapolando di *molti ordini di grandezza* al di là degli esperimenti di laboratorio.

Ci si deve domandare se tutte le proprietà del tempo valide nella fisica newtoniana *saranno ancora verificate* su scala cosmologica.

Poi ci mettiamo a studiare le *particelle*, andando sempre più nel piccolo.

Abbiamo il dovere di chiederci se tutte quelle proprietà del tempo *continuano a essere soddisfatte* e verificate alla scala microscopica che stiamo considerando.

## A che punto siamo oggi?

In una battuta, la risposta è questa: l'unico cambiamento finora è proprio quello prodotto dalla *relatività*.

In particolare ciò sta a indicare che — per quanto ne sappiamo fino ad oggi — *nell'ambito* microscopico *della fisica delle particelle* un cambiamento della natura del tempo *non si è ancora imposto*.

Non che non sia stato pensato, ma non c'è nessuna evidenza sperimentale, nessuna teoria ben fondata che usi un tempo diverso.

Invece quando pensiamo a tutto il quadro di fenomeni e di studi teorici che prende il nome di *relatività* (cosmologia inclusa), lì sì, che *c'è qualcosa di nuovo*.

La relatività rivoluziona le nostre idee sulla *struttura del tempo*.

Una delle caratteristiche fondamentali della relatività è proprio che obbliga a *ripensare la visione newtoniana* della natura del tempo.