



LEZIONE 1

Introduzione

Cominciamo con due parole sulla motivazione di questo corso. Tema del corso è: insegnare la relatività alle soglie del ventunesimo secolo.

La relatività ha ottant'anni. Non dico novanta, e c'è una ragione precisa: in tutto questo corso, quando parlerò di relatività, non farò la distinzione tradizionale fra relatività ristretta (RR) e relatività generale (RG). E siccome la RG ha preso forma compiuta nel 1916, compie ora ottant'anni.

Ottant'anni sono tanti per una teoria scientifica; quindi che ci sia motivo di cominciare a introdurla nell'insegnamento della fisica, non c'è dubbio. Dei problemi, delle difficoltà, di quello che si può o non si può fare, avremo tempo di parlarne.

La relatività è ormai una scienza matura, consolidata. Fa parte tradizionalmente del sapere scientifico dei fisici di tutto il mondo e per di più è anche ricca di nuove prove sperimentali. Oggi, dal punto di vista delle conferme sperimentali, delle conoscenze che si hanno, degli strumenti, è cresciuta molto, anche rispetto a solo trent'anni fa. Siamo di fronte a un quadro maturo, completo, organico, che dovrebbe dunque diventare parte integrante dell'insegnamento della fisica.

È mia convinzione che si possa insegnare relatività fin dall'inizio del triennio; il corso sarà in larga misura dedicato a dimostrare e illustrare questa tesi. È ovvio che non si può infilare la relatività dovunque si parli di fisica: occorre che la materia abbia un certo respiro, occorre che gli allievi abbiano avuto modo di capire che cosa s'intende per teoria scientifica; occorrono una serie di altre condizioni al contorno, per cui la relatività è certamente materia del triennio. Però badate che dico triennio, non dico ultimo anno. Mi potreste domandare: "In quelle scuole dove la fisica si fa nel biennio, la relatività non si fa?" Credo proprio di no. Ci sarebbe però da ripensare al senso che ha insegnare la fisica solo nel biennio. . .

Come ho detto, si può insegnare relatività fin dagli inizi del triennio; però per far questo occorre ripensare buona parte della fisica tradizionale. Non si può appiccicare la relatività come un argomento in più, a un certo punto di un corso. In effetti ciò non è vero solo per la relatività. Se allarghiamo il discorso a quella che si chiama — più o meno impropriamente — "fisica moderna," si potrebbe dire la stessa cosa: non si può dare spazio alla fisica di questo secolo semplicemente stringendo un po' il resto. Non solo perché a forza di stringere si rischia che non resti niente, ma anche perché la fisica di questo secolo per essere affrontata richiede anche di ripensare a tutto quello che viene prima. Certe linee tradizionali dell'insegnamento vanno riesaminate, non possono essere mantenute così come sono.

Relatività e scuola secondaria

Le cose che racconterò in questo corso sono il risultato di un lavoro che ormai dura da parecchi anni. Intorno al 1978 ho cominciato a pensare al problema di come si poteva insegnare la relatività nella scuola secondaria, con quali obiettivi, superando quali difficoltà. Questo lavoro è passato attraverso diverse fasi: corsi d'aggiornamento, lezioni di respiro più breve, discussioni, congressi, lezioni più o meno estese anche a studenti, in qualche caso interazioni con classi di studenti.

Quella che finora è mancata è stata una sperimentazione sistematica sul campo. Dato un progetto didattico, si dovrebbe trovare un certo numero d'insegnanti disponibili con le loro classi, e sperimentare il progetto. C'è una serie di ragioni che spiegano come mai una sperimentazione sistematica, organizzata, non sia mai andata in porto; ma non è questa la sede per parlarne.

Entrando nel vivo della relatività, c'è una spiegazione che debbo dare, a proposito di RR e RG. Innanzi tutto, la RR fa parte — più o meno bene — del bagaglio culturale di un laureato in fisica. Per la RG ancor oggi (un po' meno negli ultimi anni: le cose cominciano a cambiare) la situazione è diversa: è considerata materia che per il lavoro del fisico non serve; poi è complicata, usa una matematica astrusa, ecc. Insomma non fa parte del quadro delle cose che si ritiene debbano entrare nella cultura del laureato in fisica.

Naturalmente questa situazione si ripercuote sul nostro tema: se si deve insegnare la relatività nella scuola secondaria. Sulla RR non c'è discussione: tutti sono d'accordo che ne vale la pena. Ormai credo che tutti i libri di testo abbiano un capitolo sulla RR. Invece la RG no. Se è vista come difficile per chi segue un corso universitario, ancor più si ritiene difficile, per non dire impossibile, trasportarla nella s.s.s.

Uno degli scopi del corso sarà appunto sfatare questa visione della RG come qualcosa d'inaccessibile. E soprattutto insisto sul fatto (e spero che venga fuori come risultato di questo corso) che in realtà la distinzione stessa tra RR e RG non ha alcun senso. È vero che Einstein ha scritto nel 1905 un articolo da cui è nata la RR, mentre la RG è venuta dopo: Einstein ha speso degli anni a svilupparla, e ho già citato il 1916 come data finale. Però questa non è una ragione sufficiente perché la distinzione continui a sopravvivere. Già la distinzione non era così netta, tutto sommato, nella mente di Einstein negli anni che abbiamo detto; ma a maggior ragione non ha da esserlo adesso. Oggi è molto più chiaro che occorre una visione complessiva. Quindi, il messaggio che voglio trasmettervi è che *la relatività è una*: la vecchia distinzione tra RR e RG non ha ragione di essere.

Poi, se qualcuno mi chiede che cos'è questa relatività, per ora vi do una definizione sommaria: la relatività è principalmente *Fisica dello Spazio-Tempo*.

Questa lezione e la successiva saranno dedicate non alla relatività, ma alla fisica dello spazio-tempo prima della relatività; a com'è inteso lo spazio-tempo nella fisica newtoniana. La prima cosa, che si legge dappertutto, è che nella fisica newtoniana spazio e tempo sono *assoluti*. Si dovrà un po' discutere che cosa questo vuol dire, perché la parola "assoluto" ha subito una risonanza filosofica; introduce a un discorso più ampio, di tipo epistemologico, sul significato stesso della fisica.

Ma prima di affrontare questo discorso voglio rimanere un po' coi piedi per terra. Dobbiamo fare attenzione, specialmente visto che stiamo parlando di una fisica della relatività introdotta piuttosto precocemente, a non farci intrappolare in discussioni di tipo filosofico. Sarebbe un pessimo sistema, un modo d'indurre i ragazzi a prendere fischi per fiaschi, e metterli in difficoltà dalle quali non si esce più.

Ragioniamo da fisici: che cos'è lo spazio per un fisico? Ci sono delle misure, ci sono delle osservazioni, che riguardano lo spazio? E il tempo? Che cos'è il tempo per un fisico?

Mi sono accorto che nella tradizione didattica fra la trattazione dello spazio e quella del tempo c'è una certa dissimmetria. Di spazio se ne parla abbastanza, anche da un punto di vista concreto: spesso nel biennio si comincia con le misure di lunghezza, si presentano vari tipi di strumenti, si esamina come si possono misurare le distanze piccole o le distanze grandi... Invece in materia di tempo discorsi di questo genere sono molto meno frequenti. Ed è un guaio, perché se ci si occupa di relatività, la prima cosa in cui ci s'imbatte sono gli aspetti strani, paradossali, che si presentano quando si parla del tempo: i vari paradossi, orologi che vanno d'accordo o no...

La discussione può prendere una piega totalmente diversa a seconda dell'opera d'introduzione, di spiegazione, di chiarificazione delle idee fisiche sul tempo che c'è stata prima. Intendo proprio nel senso che il tempo della fisica non è quella cosa misteriosa dell'intuizione comune, oppure della filosofia. (Come sapete bene, il tempo è stato un campo di ampia discussione per i filosofi, e lo è ancor oggi.)

Per un fisico parlare di tempo significa parlare dei metodi di misura. Quindi, 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.

Tempo solare e tempo siderale

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. Non serve a niente produrre un'ombra più lunga, perché viene anche più sfumata e non ci si guadagna in precisione. Infatti l'ombra è sfumata (è circondata da una penombra) semplicemente perché il Sole è una sorgente estesa, non puntiforme.

Ma un difetto più grave della meridiana, che pochi conoscono, 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 un quarto d'ora; anzi, in qualche momento lo supera anche un po'. Il 2 novembre una meridiana è avanti di oltre 14 minuti, mentre l'11 febbraio è indietro più di 16 minuti. Quindi chi si affida a una meridiana fa una misura di tempo che non solo è imprecisa, ma è anche affetta da un errore sistematico, che può variare di mezz'ora dal massimo al minimo.

A questo punto nasce la domanda: come si fa a sapere che una meridiana va avanti o indietro? Naturalmente la risposta è che la si deve confrontare con un orologio migliore. Bisogna che sia un orologio che non abbia anch'esso delle fluttuazioni. Vedete quindi che 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?

Vi chiederete perché sto insistendo su queste cose. Perché poi nella relatività non si fa altro che parlare di orologi che si comportano in modo strano; ma se uno non ha capito bene che cosa s'intende quando si parla di un orologio di cui ci si può fidare, che cosa penserà quando sente parlare di orologi che vanno avanti o indietro?

Dopo aver ricordato che le meridiane qualche problema lo davano, avremmo davanti una lunga storia; perciò scavalco alcuni secoli. . . Si è deciso che un orologio migliore era la rotazione terrestre rispetto alle stelle, cioè guardare non il moto apparente diurno del Sole, che è il colpevole del funzionamento difettoso delle meridiane, ma il moto apparente delle stelle, che in confronto è assai più regolare. 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).

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). Questo poi, 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, o GMT in inglese) ma da parecchi anni il termine è stato sostituito da TU.

Il TU era definito (era, perché poi le cose sono cambiate) a partire dal TS. Il punto di partenza osservativo è il TS: dal moto della Terra rispetto alle stelle si ricostruisce il TU. La differenza è di scala: mentre il giorno solare medio è, come tutti sanno, di 86400 secondi, il giorno siderale è un po' meno: circa 86164 (in realtà il numero è dato con molte più cifre). La cosa importante è che fra i due c'è una differenza di circa 4 minuti: il TS guadagna circa 4 minuti al giorno sul TU. Ecco perché non potrebbe essere usato

per la vita pratica: 4 minuti + 4 minuti + ... finisce che l'orologio dice mezzogiorno e invece è notte.

Se fate il conto, vedete che quattro minuti al giorno accumulandosi durante un anno fanno un giorno intero. La ragione è che mentre il TS dà il moto della Terra riferito alle stelle, il tempo solare (quindi il TU) dà il moto della Terra riferito al Sole: c'è un cambiamento di riferimento. La Terra in un anno fa un giro intorno al Sole, e quel giro è il giorno in più del TS rispetto al TU: un anno dura 365 giorni solari (e spiccioli) mentre dura 366 giorni siderali.

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? Come possiamo dirlo?

Notate che potremmo porci anche una domanda più profonda: uniforme rispetto a che? Risposta: "rispetto al tempo, quello vero." Ma chi ha il tempo, quello vero? Naturalmente dietro a tutti questi discorsi, 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.

Questo dubbio, se il moto della Terra fosse o no uniforme, nacque in effetti prima che ci fosse la prova sperimentale che non lo è; e dal dubbio ebbe inizio una ricerca. Però la domanda è la solita: come si fa a sapere se la rotazione è uniforme oppure no? Non si può usare una meridiana per decidere la questione: bisogna avere un orologio migliore. E soprattutto un orologio indipendente, perché se tutti gli orologi che hanno i fisici sono regolati sul moto della Terra non c'è niente da fare. Occorre un altro orologio, che non sia legato al moto della Terra. E poi bisogna essere convinti che quest'altro orologio è meglio, che possiamo fidarcene di più; altrimenti come facciamo a dare la colpa alla Terra?

Non uniformità della rotazione terrestre

Vi ricordo velocemente la situazione di fatto. Le prove ci sono: è assodato che la Terra non ruota uniformemente. La rotazione terrestre ha due tipi di irregolarità, grosso modo: le irregolarità *periodiche* e quelle che diciamo *secolari*. Questo è un termine preso dal gergo astronomico: si usa per gli effetti che si accumulano nel tempo, per cui, anche se sono piccoli, col passare dei secoli...

L'entità delle fluttuazioni periodiche è piccola: sono dell'ordine del centesimo di secondo. La Terra accelera e rallenta, ma non pensate che il periodo di rotazione cambi di centesimi di secondo: solo in capo a tempi dell'ordine dell'anno, trovate l'orologio Terra alternativamente avanti o indietro di centesimi di secondo. Rispetto a che? Naturalmente rispetto al suo andamento medio. Perché succede questo? Ecco, non vorrei entrare in una spiegazione, perché mi porterebbe via troppo tempo: entrano in gioco effetti di meccanica della rotazione terrestre, e anche questioni di fisica terrestre.

Parliamo invece un po' delle variazioni secolari. Prima di tutto, ecco i dati: dall'inizio del secolo la rotazione terrestre è andata progressivamente rallentando, 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 cumulativamente sempre più indietro, e il ritardo ha superato un minuto. Quindi non è certo piccolo!

Attenzione: non concludete che il periodo si è allungato di quasi un secondo all'anno. Questa è una cosa che vale la pena di capire meglio: non è così semplice come sembrerebbe

a prima vista. Vi propongo perciò come problema di descrivere esattamente che cosa significa dire che il rallentamento progressivo della rotazione ammonta a oltre un minuto nell'ultimo secolo.

Quando si è scoperto che la Terra aveva delle irregolarità (non tanto quelle periodiche, che poi sono piccole, ma soprattutto quelle secolari) gli astronomi hanno concluso che non si poteva più ritenerla un buon orologio. Perciò la scala di tempo, e la definizione dell'unità di tempo (il secondo) non potevano più essere agganciate al periodo della rotazione terrestre: si sarebbe costruita un'unità di tempo ... che cambia col tempo (scusate il gioco di parole). Si è trovata quindi una definizione indipendente, che tra poco vedremo, per il secondo, e per la scala di tempo.

Questo però ha fatto nascere un altro problema, di carattere pratico. Noi viviamo sulla Terra: la Terra gira, e causa il giorno e la notte; il sorgere del Sole, gli orari della vita quotidiana, tutto dipende da come gira la Terra, non dal tempo costruito in laboratorio. Come si fa a conciliare le due cose?

Avrete osservato che ogni tanto radio e TV trasmettono dei messaggi misteriosi, espressi in termini incomprensibili (forse perché per primi quelli che li hanno scritti non hanno capito di che cosa stessero parlando). Succede di solito il 31 dicembre: il giorno dopo il TG vi dice: "stanotte gli orologi sono stati fermati per un secondo." Seguono poi frasi come "siamo un secondo più giovani" (o più vecchi? non ho mai capito ...).

Il punto è che ormai la scala del tempo è stabilita da un sistema di orologi campione, che camminano per i fatti loro, ignorando il moto della Terra. Se però continuassimo a segnare il tempo con quegli orologi, a lungo andare troveremmo uno sfasamento rispetto alla rotazione terrestre. Per evitare questo, per convenzione internazionale si è deciso che quando la differenza che si è accumulata è quasi un secondo, un addetto preme un pulsante: sì che gli orologi segnino un secondo di meno, rimettendosi al passo col moto della Terra.

Insomma: occorre fare i conti da un lato con le esigenze scientifiche, dall'altro con quelle pratiche: il tempo che viene distribuito dai segnali orari deve andare abbastanza d'accordo col moto della Terra, però è costruito in base a campioni di laboratorio. Perciò si ricorre a un compromesso: ogni tanto il tempo campione viene fermato per un secondo.

La storiella di Zanzibar

Ma torniamo al problema veramente importante: per scoprire le irregolarità della Terra ci vuole un orologio migliore. C'è una vecchia storiella, detta "di Zanzibar," che aiuta a fissare la natura del problema.

Siamo nell'800, quando non c'era ancora la radio. Le navi, come sapete, avevano bisogno di portarsi dietro degli orologi, per "fare il punto": la misura della longitudine in mare richiedeva l'osservazione delle stelle, ma anche l'uso di un orologio. Quindi per una nave avere un orologio buono, affidabile, era cosa vitale.

Il che, fuori della storiella, mi porterebbe a raccontare dell'importanza che ha avuto, nell'Inghilterra del '6-'700, per lo sviluppo degli strumenti scientifici, quest'esigenza pratica della marina, del commercio, che per gli inglesi era di primaria importanza. L'Ammiragliato britannico nel '700 bandì un premio di 20 000 sterline, che fu vinto da Harrison. Questi aveva inventato il prototipo dei cronometri da marina: un orologio compensato termicamente e montato su sospensione cardanica. Quei cronometri sono ormai un reperto archeologico, dato che il tempo si riceve per radio; ma vi invito a riflettere su quanto abbia influito questa "semplice" innovazione tecnica sullo sviluppo della cosiddetta "civiltà occidentale" ...

Torniamo alla storiella. Il capitano di una nave ha il suo bravo cronometro; però a un certo punto gli si ferma, e sono guai. Per fortuna si trova vicino a Zanzibar, un'isola vicina alle coste dell'attuale Tanzania. Così dirige la nave al porto, scende a terra e

si mette in cerca di qualcuno che gli dia l'ora esatta, che gli faccia rimettere l'orologio. Chiede notizie, e gli dicono che giù, nella città vecchia, nei vicoli, c'è un vecchio orologiaio, bravissimo. Lui va dall'orologiaio, ci parla, si convince che è una persona seria, che di orologi se ne intende davvero. Poi, solo per scrupolo, gli chiede: "Lei fa degli orologi, ed è molto accurato, lo vedo; ma anche i suoi orologi andranno rimessi, di tanto in tanto: come fa?" E quello: "Ah, ma noi abbiamo qui la guardia costiera, molto efficiente: tutti i giorni, a mezzogiorno esatto, spara il cannone; io i miei orologi li rimetto sempre sul cannone della guardia."

Bene, lì per lì il capitano accetta la cosa. Poi, uscito dal negozio ci ripensa e gli viene il dubbio: e quello della guardia costiera come fa? Guarda caso, incontra il comandante della guardia e glielo chiede: "Voi avete un cannone che spara a mezzogiorno, ma siete sicuri? Avete un orologio ...?" "Il nostro orologio va benissimo" "Andrà benissimo; ma per quanto possa andare benissimo, anche quello ... come fate a rimetterlo?" "Certo, ma sa, giù nella città vecchia c'è un orologiaio ..."

C'è dunque il pericolo di un giro vizioso. Per sapere se il mio orologio va bene, con che cosa lo confronto? con un altro orologio? E questo, con che cosa lo confronto?

Gli orologi al quarzo

La prova che la Terra non era un orologio perfetto è di poco più di sessanta anni fa. Fino a quel tempo, i migliori orologi disponibili erano gli orologi a pendolo. Ma 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". Il primo è 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. Secondo: gli orologi a quarzo. Come vedete, si tratta di due tecniche completamente diverse: la prima si appoggia fortemente sull'astronomia e sulla meccanica celeste, la seconda — gli orologi a quarzo — richiede l'elettronica. Negli anni '30 esisteva già la capacità di costruire strumenti elettronici affidabili (non a transistor naturalmente) e si sapeva utilizzare i cristalli di quarzo come campioni di frequenza. Ora questa è diventata una cosa comune, l'orologio al quarzo l'abbiamo al polso; a quel tempo invece per contenere tutto l'apparato ci voleva una stanza. Comunque erano già orologi sufficientemente affidabili per scoprire che la Terra non si comportava bene.

In effetti 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. Con gli orologi a quarzo è stato scoperto che la rotazione della Terra ha delle accelerazioni e dei rallentamenti con periodi dell'ordine dell'anno.

Vediamo ora brevemente come funziona un orologio al quarzo. Ogni orologio (quasi: clessidre e simili fanno eccezione) si basa su un sistema fisico capace di moto periodico, dotato di una frequenza propria di oscillazione. Nel caso degli orologi a quarzo, il sistema che ho detto è un cristallo di quarzo. Tenete però presente che in questo contesto "cristallo di quarzo" non vuol dire quello che si trova in natura: quei cristalli a forma di prisma esagonale con piramidi sulle basi, ecc. Qui s'intende quarzo cristallino (non amorfo) costruito artificialmente e tagliato nella forma desiderata, che può essere un anello, una barretta, una piastrina...

Si prende dunque un cristallo di quarzo (pensiamo per es. a una barretta) e lo si mette in oscillazione, per es. longitudinalmente. Il quarzo è un cristallo, quindi un corpo solido: ha una sua costante elastica e una frequenza di risonanza propria. Perché proprio il quarzo? Perché è un cristallo che ha particolari caratteristiche di stabilità, la cui frequenza non cambia molto nel tempo per influenze esterne. Poi ne parliamo; ma per ora è un aspetto secondario.

Dato che il quarzo è piezoelettrico, le oscillazioni producono cariche e differenze di potenziale tra le due facce. Se su queste si mettono dei conduttori e li si collegano a un amplificatore, si ottiene una differenza di potenziale che naturalmente varia sinusoidalmente con la frequenza di oscillazione del quarzo. Si manda la tensione a un contatore connesso a un display digitale; o a un motore con cui si fa camminare una lancetta ... e tutto sembra fatto. Invece non è finita. Perché?

È chiaro che l'oscillazione si smorza. È come se facessi oscillare un pendolo: prima o poi l'oscillazione si smorza. L'orologio non può consistere solo di un oggetto che ha una frequenza di oscillazione propria: ci vuole qualcosa che lo mantenga in oscillazione. C'è una dissipazione di energia; il quarzo è un materiale "buono," ossia molto elastico, quindi la dissipazione è piccola (e questa è una delle ragioni per cui si usa il quarzo); però una certa dissipazione esiste comunque. Quindi bisogna rifornire energia.

Perciò il circuito connesso al cristallo non ha solo la funzione di accorgersi che il quarzo oscilla; ha anche quella di mantenere le oscillazioni. Negli orologi a pendolo ci sarà il peso e lo scappamento: quando il peso è arrivato giù qualcuno lo deve tirare su, altrimenti l'orologio si ferma: l'energia è fornita dalla gravità. Nel caso del quarzo l'energia viene fornita da questo circuito, che non è solo un amplificatore, ma esercita anche la funzione positiva di mantenere le oscillazioni del quarzo. S'intende che occorrerà anche una sorgente primaria di energia, che nel caso degli orologi da polso è una pila.

Viene spontanea la domanda: e se invece della Terra fossero gli orologi al quarzo a non comportarsi bene? Alla fine vi proporrò una serie di domande riguardo a questo problema.

Il tempo delle effemeridi e il tempo atomico

Passando al moto del sistema solare, da questo si definisce il tempo delle effemeridi (TE), che dal 1955 ha sostituito 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. Solo in prima approssimazione le orbite sono ellittiche e valgono le leggi di Keplero; in realtà ci sono delle perturbazioni, dovute all'interazione di ciascun pianeta con gli altri. Ci vogliono un bel po' di calcoli complicati per prevedere dove dovrebbe stare un certo pianeta a un certo momento, ma lo si può fare, specialmente disponendo di calcolatori. Solo che invece d'interessarsi della posizione di un pianeta dato il tempo, si segue il procedimento inverso: si guarda il pianeta (se ne determina la posizione) e da questa, per confronto con la tabella calcolata delle posizioni (effemeride) si ricava il tempo.

È ovvio però che si tratta di un metodo scomodo e complicato: richiede tutta una serie di osservazioni raffinate, un apparato di calcoli. . . Non si tratta di un procedimento alla portata di tutti in ogni momento. Non si può pensare che uno si porti dietro un computer, e quando gli serve il tempo guardi Venere, faccia girare il computer e ne ricavi che ora è. Di fatto questo sistema di *determinazione del tempo* serve solo per tenere al passo giusto degli orologi più usuali, ai quali è affidato il compito della *conservazione del tempo* tra un'osservazione e l'altra. Sono questi orologi che alla fine forniscono i segnali orari utilizzati nei laboratori come nella vita pratica. Anzi erano; perché, come vedremo subito, pochi anni dopo il sistema è cambiato ancora.

A parte la scomodità pratica del TE, nasce comunque lo stesso problema: ma il TE sarà uniforme? Chi ci dice che il tempo ricavato dai pianeti sia uniforme? Riprenderò il discorso più avanti.

Nel '67, solo 12 anni dopo, la definizione del tempo è stata buttata all'aria un'altra volta: è stato adottato come campione il tempo atomico (TA). 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, con gli orologi atomici. Dal '67 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.

Effetti relativistici in astronomia

Aggiungo ora una cosa che non c'entra direttamente, ma vi dà un'idea della raffinatezza alla quale siamo arrivati nelle misure di tempo. Dal 1984 gli astronomi si sono rassegnati (dico rassegnati perché nessuno si complica volentieri la vita) 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 fermo rispetto al Sole non vanno d'accordo. La differenza varia nel corso dell'anno, ma non supera i due millesimi di secondo; però la precisione delle osservazioni è tale che bisogna tenerne conto.

Preciso meglio la situazione. Quei 2 ms vogliono dire questo: accanto al nostro orologio sulla Terra, pensiamo a un orologio su un'astronave che non sta in orbita, ma sta ferma a distanza fissa dal Sole; diciamo alla distanza media della Terra (cosa che oggi si potrebbe anche fare). Allora l'orologio sull'astronave e quello sulla Terra mostrano delle discordanze periodiche, dovute al moto della Terra. Queste discordanze assommano, nel corso di un anno, a meno di 2 ms.

Concludo il discorso sulla storia del tempo con un problema aperto: $TA = TE$? Visto che dal '67 il campione di tempo è il TA, nasce il problema: ma TE e TA sono lo stesso tempo? Che è un altro modo di porre la domanda di prima: il TE fornisce un orologio uniforme? Ammesso che quello atomico lo sia, i due orologi vanno d'accordo? Questo è ancora un problema aperto: ci sono dubbi, ci si lavora, si fanno misure. Ogni tanto sembra che qualcuno abbia scoperto delle differenze, ma poi la cosa rientra. Insomma è ancora oggetto di ricerca.

Ma la cosa importante è che si tratta di un problema su cui 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 che si muove per i fatti suoi. E la domanda è: i due tempi vanno d'accordo? Questo è assoggettabile a indagine sperimentale. Che gli orologi per ora non siano sufficientemente sensibili da poter decidere, è un altro discorso; ma in linea di principio le osservazioni possono dare la risposta.

Discussione

Domanda: Dunque gli orologi sono diventati così precisi che sono in grado di sentire effetti relativistici?

Risposta: Certo! Almeno in questo caso. Ci sono anche altri casi in astronomia in cui gli effetti relativistici sono significativi, ma il più importante è questo.

D. Volevo chiedere l'ordine di grandezza della differenza fra il TA e il TE.

R. Di questo non si sa assolutamente niente: nel quadro delle osservazioni che si possono fare non vi sono differenze apprezzabili. La sensibilità degli strumenti è tale che nel periodo di un anno 2 ms si vedono, ma differenze di qualche ordine di grandezza minori non sono osservabili. Quindi quello che possiamo dire è che le differenze non sono note. Se fossero — poniamo — di $1 \mu\text{s}$, attualmente non sarebbero osservabili.

Intervento: La differenza potrebbe anche esserci; se non si vede, non è detto che non ci sia.

R. Certamente! Quando si dice che l'effetto è zero, è sempre entro il limite dell'errore. Quindi non non si può mai dire "ho dimostrato che non c'è differenza." C'è ogni tanto qualcuno che dice di aver trovato una differenza, poi si scopre qualche sbaglio nelle misure o nei calcoli. È una questione dibattuta, ma non c'è nessuna prova sicura che la differenza esista.

Se mi è consentita una piccola malignità, la ragione per cui ogni tanto qualcuno dice di aver visto una differenza la potete immaginare: uno che trovasse davvero la differenza, prenderebbe il Nobel. Quindi c'è una forte tentazione a trovare un effetto di questo genere. Poi risulta che era stato un po' precipitoso, che non aveva controllato adeguatamente qualcosa, aveva dimenticato un errore sistematico nelle misure, ecc. Il fatto è che se uno ha il sospetto di aver trovato qualcosa lo pubblica, anche prima di essere ben sicuro; se non lo facesse, rischierebbe di essere anticipato e di perdere la priorità della scoperta.

Problemi e discussione

1. Verificare la variazione del tempo solare, misurando l'istante di passaggio del Sole (ora, fine maggio, ritarda oltre 1 min/settimana).

Questo lavoro richiede una o più settimane. Dovete escogitare come si può fare in casa propria. Non ci vuole un laboratorio: dovete mettere su un qualche aggeggio che vi consenta di scoprire (che si può, ve lo dico io) che se guardate la posizione dell'ombra oggi, poi la guardate tra una settimana, poi tra due settimane, vedete che la stessa posizione non viene raggiunta alla stessa ora.

2. Discutere e spiegare che cosa esattamente significa che “il TU è indietro di oltre un minuto dall'inizio del secolo.”

Ne abbiamo già parlato, ma dovete dare una spiegazione più approfondita. Se si dicesse ingenuamente: 60 secondi in 90 anni fa circa 0.7 s/anno, quindi il periodo in un anno aumenta di 0.7 s, sarebbe sbagliato.

3. Che cosa ci assicura che la discordanza fra TS e orologi sia colpa della Terra?

Abbiamo detto: la Terra non è un buon orologio, come si è visto con gli orologi a quarzo. Ma che cosa ci assicura che la differenza tra il TS e un orologio a quarzo sia dovuta alla Terra? Potrebbe dipendere dall'orologio a quarzo; come si fa a scegliere? Come fareste voi a scegliere?

4. Quali perturbazioni influenzano un pendolo? e un orologio a quarzo?

Questa domanda è un po' più semplice, ma c'è tanta roba da scavare. Anticipando un discorso che riprenderò la prossima volta: gli orologi sono sempre sensibili alle influenze esterne. Vi chiedo di riflettere su quali sono le perturbazioni esterne che possono influire sulla marcia di un orologio a pendolo, quali quelle che possono influire su un orologio a quarzo. Per ora diciamo quali; poi magari si può andare un po' più a fondo, discutere quanto; ma per ora cercate di vedere di quali situazioni ambientali si deve tener conto quando si usa un orologio.

5. Quali orologi sono sensibili alle accelerazioni?

Questo interessa di più per un discorso che devo fare dopo (e perciò dovremo pensare anche agli orologi atomici).

Faccio notare che le domande 4 e 5 hanno uno scopo preciso: sottolineare che gli orologi *sono strumenti*, sono meccanismi, funzionano in un certo modo. Quindi, quando ci si domanda se “sono soggetti o no . . .” per rispondere si devono guardare i principi di funzionamento, si deve cercare nella fisica del particolare orologio; non altro.

Discussione sul problema 2:

Fabri: Qualcuno ha detto: 60 secondi diviso 100 anni fa un po' più di $2 \cdot 10^{-3}$. Che cosa vuol dire questo?

I: La differenza tra il giorno di oggi e quello di 100 anni fa: $T(\text{oggi}) - T(1900)$, dove con T intendo il periodo di rotazione della Terra.

F: Sentiamo qualcun altro.

I: In questo tempo la Terra ha rallentato, quindi il primo anno ci sarà un certo scarto, l'anno dopo ci sarà uno scarto maggiore e tutti questi si sommano:

$$(60\text{ s})/(100\text{ anni}) = 2 \cdot 10^{-8}$$

$$2 \cdot 10^{-8} \times 86400\text{ s} \simeq 2 \cdot 10^{-3}\text{ s} = T(\text{oggi}) - T(1900).$$

F: Non si può pensare che ogni anno ci sia lo stesso rallentamento, lo stesso ritardo. La Terra continua a rallentare; quindi se il primo anno c'è uno scarto, il secondo anno ci sarà uno scarto doppio, ecc. Bisogna fare la somma in maniera diversa.

I: Se ritarda mettiamo di un secondo l'anno, il primo anno ha un secondo di ritardo, il secondo anno pure ... ho chiamato a il ritardo, ho fatto la somma, per cui in 100 anni diventa ...

F: Cioè sta dicendo: a è il ritardo nel primo anno, $2a$ il ritardo nel secondo anno ...

$$a + 2a + 3a + \dots$$

È così?

I: Sì. Faccio così perché il ritardo è piccolo; altrimenti la cosa sarebbe più complicata. ...

F: D'accordo. E così viene fuori il problema di Gauss: quello di sommare i primi cento numeri interi. Conoscete la storia del problema di Gauss?

I: Quindi il ritardo nel periodo di oggi non è a , è $100a$.

F: La cosa che mi piacerebbe di più è vedere come spieghereste questo fatto, in un modo che non sia totalmente estraneo alla fisica che spiegate: che usi se possibile gli stessi argomenti, gli stessi concetti, le stesse tecniche, ecc. Il problema che abbiamo è: si dice che oggi l'orologio Terra è indietro di 60 s. Che vuol dire? Non è altro che un problema di cinematica. Il moto della Terra è ritardato, ha un'accelerazione negativa. Allora ci si può chiedere quanto vale quest'accelerazione, a partire dal ritardo accumulato. Quant'era il periodo all'inizio del secolo? Assumiamo che fosse 24 ore (non esattamente, era un giorno siderale); quanto è diventato adesso?

Però il metodo che mi avete descritto è diverso da quello che avreste usato se lo aveste visto come un problema di cinematica. Se invece della Terra si trattasse del piatto di un giradischi (di quelli dei tempi antichi, prima dei CD) fareste un ragionamento differente. In quel caso avreste pensato in termini cinematici. Siccome invece abbiamo parlato della Terra come orologio, ossia di un tempo dato in funzione di un altro tempo, allora è venuto naturale usare un linguaggio diverso. Ripensateci. ...

Discussione sul problema 3:

Il nostro problema è: come faccio a sapere che la colpa è della Terra e non degli orologi a quarzo? Io ho il mio orologio a quarzo in laboratorio; lo confronto con le osservazioni astronomiche, con la rotazione della Terra, e trovo che oggi è avanti; poi è avanti un po' di meno, poi è indietro, poi più indietro, poi di nuovo avanti: la differenza tra i due orologi ha un andamento oscillante.

D: Come mai in un lungo periodo gli orologi a quarzo non sono affidabili?

F: Perché i cristalli invecchiano. A lungo andare si producono delle modificazioni nella struttura interna, nelle imperfezioni del reticolo, per cui la frequenza "deriva," cambia lentamente.

I: Probabilmente le variazioni del quarzo sarebbero sempre nello stesso verso.

F: Non è detto: si può pensare che il quarzo potrebbe risentire di varie perturbazioni che hanno andamento periodico nel corso di un anno. ...

I: Se gli orologi al quarzo vanno d'accordo tra di loro ...

F: Ecco: gli orologi al quarzo non sono uno, ogni laboratorio si fa il suo. Sono orologi fatti da fabbricanti diversi, da laboratori diversi, uno diverso dall'altro. Se li facessero tutti uguali si potrebbe spiegare che vadano d'accordo anche se non sono "giusti." Ma sono diversi e situati in luoghi diversi; quindi non è pensabile che tutte le influenze esterne, che certamente ci sono, siano uguali per i diversi orologi.

Non a caso la domanda seguente è: quali sono le influenze esterne? Sarebbe assai difficile spiegare una perturbazione che agisce nello stesso modo su un orologio che sta a Milano, uno che sta a Washington, uno che sta a Tokio. Questo è il punto: gli orologi sono differenti, sono stati costruiti da laboratori differenti, stanno in posti differenti, e confrontati tra di loro vanno d'accordo. Non è affatto casuale che queste cose siano state realizzate quando è stato possibile confrontare orologi in posti diversi della Terra, scambiando informazioni radio. Altrimenti come faremmo a saperlo? Per via radio si scambiano i segnali orari e si vede se gli orologi vanno d'accordo. Tra loro vanno d'accordo, con la Terra no. Questa è la situazione.

Notate che dal punto di vista strettamente logico, questo non dimostra un bel niente. Se posso dirlo con una battuta, è per questo che con i matematici non si va mai d'accordo... Da un punto di vista logico non possiamo escludere che tutti questi orologi, per qualche ragione a noi sconosciuta, effettivamente sbagliano tutti insieme. Però, se debbo scommettere, io sto dalla parte dei quarzi.

Discussione sul problema 4:

Vediamo ora chi riesce a trovare il maggior numero di fattori esterni che possono influenzare la marcia di un orologio a pendolo.

I: La temperatura.

F: La temperatura perché? Prima ho ricordato Harrison, che vinse il premio di 20000 sterline per il cronometro da marina. Un'altra grande invenzione di Harrison è il sistema bimetallico per compensare i cambiamenti di lunghezza del pendolo dovuti alla dilatazione termica. Risale circa al 1730. Naturalmente, non pensate che l'effetto della dilatazione venga eliminato completamente, ma viene molto ridotto. Poi è stato inventato l'invar, una lega con coefficiente di dilatazione estremamente piccolo.

I: C'è poi una variazione di periodo dovuta all'ampiezza di oscillazione.

F: Giusto: tutto ciò che modifica l'ampiezza di oscillazione agisce sul periodo. Si dice che le oscillazioni sono isocrone, ma ...

I: Le piccole oscillazioni.

F: Sì, ma quanto piccole? Vi scrivo una formula:

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{16} \alpha^2 + \dots \right)$$

dove α è l'ampiezza, T_0 il periodo ad ampiezza 0. Ad es. se $\alpha = 0.1$ rad, il secondo termine è $< 10^{-3}$. Sembra piccolo; ma pensate a un pendolo che sbaglia di 10^{-3} : che cosa significa?

Dato che in un giorno ci sono 1440 minuti, si trova un minuto al giorno. Per gli effetti che cerchiamo sarebbe un pendolo da buttare! Non ci si può permettere di avere variazioni di ampiezza di questo genere. Quindi l'osservazione sull'ampiezza è importante e giusta: è un problema che dobbiamo risolvere.

I: Penso sia stato risolto con il pendolo a cicloide.

F: Sì, era quello che volevo dire. Il pendolo cicloidale teoricamente ha un periodo che non dipende dall'ampiezza. Teoricamente, perchè si debbono risolvere altri problemi; per es. il dispositivo che produce la cicloide ha attriti notevoli. Quindi i pendoli cicloidalici sono difettosi per un altro verso. Un'altra via è cercare di mantenere costante l'ampiezza.

I: Si potrebbe fare con un meccanismo di risonanza. Ho visto questo per un diapason elettromagnetico, ma penso si possa applicare anche a un pendolo.

F: Abbiamo esaminato l'ampiezza; c'è altro?

I: Il luogo.

F: Vero, però non è un effetto che cambia col tempo, se l'orologio sta sempre nello stesso posto.

I: Il piano di oscillazione.

F: Se vuoi dire che il piano di oscillazione potrebbe non essere verticale, non è un problema. Si può fare in modo che il pendolo si disponga automaticamente in verticale: tutti i pendoli reali sono fatti così.

I: L'accelerazione va considerata in qualche modo; vale anche per gli orologi a quarzo.

F: Questo rientra nella domanda seguente, la vedremo dopo. Manca ancora un effetto importante. . .

I: La densità dell'aria.

F: La densità dell'aria perché?

I: Per la spinta di Archimede.

F: Questo è un motivo; ma ce n'è anche un altro.

I: Lo smorzamento.

F: Sì, un oscillatore smorzato ha un periodo diverso da uno non smorzato.

Ma torniamo alla spinta di Archimede. L'entità dell'effetto dipende naturalmente dalla materia con la quale si fa il pendolo. Supponiamo che sia fatto di bronzo, di rame, di qualcosa che abbia una densità di circa 10 g/cm^3 . La densità dell'aria è 10^{-3} g/cm^3 , e rapporto è 10^{-4} . Quindi tra un pendolo nel vuoto e un pendolo nell'aria a pressione atmosferica, la variazione di periodo dovuta alla spinta di Archimede è dell'ordine di 10^{-4} . Non è tantissimo, ma non è neppure poco. Però l'aria c'è sempre, per cui la sola cosa che conta è il cambiamento della densità dell'aria. Se per es. cambia la temperatura, la densità dell'aria cambierà un po', ma non tanto; quindi si avrà un effetto molto più piccolo. Ricordiamoci però che l'orologio Terra sbaglia alcuni centesimi di secondo in un anno; se si va a vedere quanto dev'essere buono un pendolo per scoprire un effetto del genere, si scopre che la densità dell'aria è importante, e come! Quindi bisogna tenerne conto; la cosa migliore è mettere il pendolo sotto vuoto, col che si elimina anche lo smorzamento.

Ci può essere altro per un pendolo?

I: La presenza di un campo magnetico.

F: Certo. In primo luogo, se il pendolo contiene sostanze ferromagnetiche c'è una forza significativa; poi ci sono le correnti indotte, il cui effetto prevalente è di aumentare lo smorzamento. Attraverso questo possono cambiare l'ampiezza.

I: E anche il periodo.

F: Sì, agiscono come un attrito qualunque, quindi cambiano anche il periodo.

I: Variazioni di gravità dovute alla Luna.

F: Ossia alle forze di marea. Questo è un discorso serio ma complicato. Si tratterebbe di vedere quanto è, se è un effetto importante. Delle forze di marea ne riparleremo ampiamente.

I: Per evitare l'effetto del campo magnetico terrestre bisognerebbe tenere il piano di oscillazione nella direzione del meridiano, o meglio nella direzione del campo magnetico: se si tiene in questa direzione . . .

F: A dire il vero, quello che mi dà fastidio non è che ci sia il campo magnetico, ma che questo cambi, come al solito. Ma visto che mi avete citato campi magnetici, potevate nominare anche i campi elettrici.

I: Si schermano.

F: Certo, il rimedio si trova; ma come in tutti i problemi di fisica sperimentale, per rimediare bisogna che prima ci si pensi. Per questo è importante esaminare tutte le possibilità.

Notate che qui entra in modo benefico la concorrenza fra diversi ricercatori. Quando uno pubblica un lavoro, può venir fuori un altro: “ma tu non hai pensato che c’era questa cosa!” Se il primo non ci ha pensato, ci ha pensato quell’altro, tutto contento, per così dire, di potergli fare le bucce. Andando avanti così si eliminano man mano tutte le cause di errore.

Bene: contentiamoci per il pendolo, e passiamo agli orologi a quarzo. Provate a dirmi quali sono gli effetti che possono disturbare gli orologi a quarzo.

I: Uno lo ha detto lei, l’invecchiamento.

I: La temperatura.

I: La pressione.

I: I campi elettrici.

F: La temperatura sì, certamente. Però il quarzo non è un cristallo isotropo; di conseguenza, a seconda di come lo si taglia la dilatazione termica è diversa, e ci sono dei modi di tagliarlo per cui la dilatazione termica è trascurabile. In effetti qui non è importante la dilatazione termica, ma come cambia il modulo di elasticità con la temperatura. Ci sono dei tagli per cui l’effetto della temperatura si può ridurre molto.

La dipendenza dalla temperatura per un oscillatore a quarzo la potete verificare facilmente in laboratorio, se disponete di due frequenzimetri. Uno lo si accende e lo si lascia acceso un bel po’ di tempo, in modo che arrivi a temperatura di regime. Si accende il secondo e si collega al primo. Tutti i frequenzimetri hanno un connettore di uscita del segnale dell’oscillatore interno: basta collegarlo all’ingresso del primo. Facendo questo, potete vedere la variazione di frequenza mentre il secondo oscillatore si scalda. Mi pare che per frequenzimetri non particolarmente raffinati la differenza sia sulla quinta cifra, ma si vede bene.

I: Le impurità.

F: Ricordate che non si tratta di vedere qualcosa di permanente, ma qualcosa di esterno che può cambiare, e con ciò modifica il funzionamento dello strumento. Per esempio: la densità, la pressione dell’aria possono influire? Normalmente i cristalli di quarzo si trovano in scatole chiuse, quindi gli effetti atmosferici sono trascurabili.

Lo scopo di tutto il discorso è di ribadire che di fronte a un orologio ci si deve porre queste domande. È chiaro che se poi trovo un orologio che di suo, per com’è fatto, è poco sensibile alle influenze esterne, tanto meglio: se è poco sensibile, sarà più facile renderlo insensibile. Una qualità importante di un orologio è proprio questa.

Un orologio a pendolo, per esempio, come abbiamo visto è sensibile a moltissime influenze. A proposito, avevamo dimenticato un’altra possibile influenza: le vibrazioni.

I: I terremoti.

F: Non occorrono eventi disastrosi come i terremoti. Basta molto meno: un camion che passa per la strada, vibrazioni di qualunque tipo. Dato che il pendolo è un congegno meccanico, tutte le azioni meccaniche lo disturbano. Un altro congegno, costruito su un principio di funzionamento diverso, ne risentirebbe meno. Non che un orologio a quarzo non risenta delle vibrazioni; però il cristallo di quarzo è piccolo, si può sospendere facilmente in modo elastico, così che se anche passa un camion non se ne accorge. Con l’orologio a pendolo questo è molto più difficile.

Discussione sul problema 5:

Proviamo ora ad affrontare la questione a rovescio: invece di chiederci quali sono le cose che influenzano un orologio, vediamo quali sono gli orologi sensibili alle accelerazioni. Lasciamo da parte gli orologi atomici: ne parleremo dopo più ampiamente.

I: La clessidra, se uno la fa cascare.

F: Certo, e non è uno scherzo. La clessidra, come il pendolo, funziona in base all'esistenza di un campo gravitazionale. Ci vuole la forza di gravità, anche se per motivi differenti. La sabbia di una clessidra deve cadere, quindi l'accelerazione influisce. Se porto un'orologio in macchina, e faccio una frenata, entrano in gioco le forze apparenti. Queste agiscono sia sul pendolo che sulla clessidra.

In particolare, clessidra e pendolo, come congegni che funzionano in base alla gravità, se li metto su un satellite in orbita non funzionano più: qui non si tratta di piccole variazioni.

I: Ma anche su una macchina in movimento, un treno.

F: Le accelerazioni della macchina o del treno influiscono, ma io volevo sottolineare che se lo metto in un ambiente dove non si sente la forza di gravità, l'orologio si ferma del tutto. L'effetto dell'accelerazione su pendolo e clessidra è disastroso, proprio perché il loro funzionamento si basa sulla gravità.

Gli orologi al quarzo sono sensibili all'accelerazione?

I: Sì! No!

F: Avete ragione tutti e due, in un certo senso. Per capire perché, parliamo prima degli orologi a bilanciere. Avete mai sentito qualcuno che dice: "Il mio orologio, a seconda se lo metto verticale od orizzontale cambia la marcia"?

I: Per via dell'attrito.

F: Sì, può essere l'attrito, certamente.

I: Cambia la pressione sulle molle.

F: Un orologio a bilanciere ha una rotella che oscilla, ruotando intorno a un asse; c'è poi una molla a spirale, che dà una forza di richiamo; poi l'ancora, ossia il sistema detto "scappamento," che serve per dare al bilanciere delle piccole spinte al momento giusto. Ed ecco la domanda: se questa rotella che oscilla sta in un piano orizzontale o verticale, può fare qualche differenza?

La forza di gravità influenza il moto di un corpo che oscilla intorno a un asse? Dipende dalla posizione del baricentro. Un orologio ben fatto è bilanciato, il che vuol dire che il baricentro del bilanciere sta sull'asse. Nel bilanciere ci sono dei pioletti, che si possono mettere o togliere, proprio per bilanciarlo.

Se il baricentro è sull'asse, allora il momento della forza di gravità è nullo. Potrà ancora agire l'attrito, ma non c'è un effetto diretto della gravità. La cosa cambia se il baricentro non sta sull'asse. Allora oltre alla molla c'è un'altra forza di richiamo, la gravità, e l'effetto cambia a seconda che il baricentro si trovi più alto o più basso dell'asse. Se sta più basso, cosa fa il periodo per effetto della forza di gravità, aumenta o diminuisce?

I: Diminuisce.

F: Giusto: diminuisce. Se invece fosse in alto aumenterebbe. In realtà ho sottinteso che si tratti di piccole oscillazioni, come quelle di un pendolo, mentre le oscillazioni del bilanciere di un orologio sono molto più grandi, qualcosa come un giro e mezzo; però l'effetto rimane quello che abbiamo detto. Quindi un orologio a bilanciere (non bilanciato) è sensibile all'accelerazione.

I: L'accelerazione agisce anche sulla molla, la deforma.

F: Certamente, anche questo.

I: Non riesco a pensare a un orologio insensibile all'accelerazione.

F: D'accordo, ma il problema è *quanto* sensibile.

Ora voi mi direte che sto barando, ma c'è una ragione molto più semplice per cui entra in gioco l'accelerazione. Se lascio cadere il mio orologio da polso al quarzo, si rompe, si ferma: perché?

I: Perché l'accelerazione è notevole.

F: D'accordo, ma perché si ferma?

I: Provoca la rottura.

F: Vediamo. C'è un cristallo, che nell'urto viene sottoposto a una violenta deformazione; ci sono fili, saldature, un sacco di cose che si possono deformare, e anche rompere se l'accelerazione è troppo grande.

Voi direte: bella scoperta! Ma l'ho detto per mettere in evidenza che quando si parla di accelerazione bisogna pure precisare. È chiaro che quando noi andremo in cerca di orologi buoni, cercheremo anche orologi insensibili alle accelerazioni. Mi dite: tutti sono sensibili. Tutti sono (siamo) sensibili a tutto: il problema è quanto.

Mettiamo un orologio (a pendolo, da polso o quello che volete) in un razzo, che a un certo punto parte con una certa accelerazione. Assumo anzi che l'accelerazione aumenti piano piano, regolando la spinta dei motori. Per cominciare, pensate al caso più semplice: un pendolo ossia una massa appesa ad un filo. L'accelerazione produce naturalmente una forza apparente $-ma$; se l'accelerazione è rivolta verso l'alto, la forza apparente sarà diretta verso il basso, quindi la massa appesa al filo pesa di più: al suo peso effettivo si aggiunge la forza apparente. Il filo sente una tensione maggiore, e se l'accelerazione diventa così grande che la tensione supera il carico di rottura del filo, questo si rompe.

Altro esempio: due motociclisti, uno dietro l'altro, viaggiano alla stessa velocità e a un certo momento frenano. Essi sono collegati da una bacchettina molto sottile; se frenano allo stesso modo, cioè con la stessa accelerazione, mantengono la stessa distanza e la bacchetta non si rompe; se invece uno frena di più e l'altro frena di meno, allora la bacchetta si rompe. Quindi posso anche avere un'accelerazione grandissima, purché le accelerazioni delle varie parti siano le stesse.

L'orologio che cade però è un caso diverso: ha delle parti appoggiate, sospese, collegate le une alle altre, che sono tenute in posizione grazie alle reazioni vincolari (come il caso del filo, che è l'esempio più ovvio). Anche un cristallo di quarzo sta tra due elettrodi metallizzati e due fili. Il cristallo ha un peso, anche se piccolo, che è compensato dalla reazione vincolare dei fili e del sostegno su cui i fili vanno a finire.

Se devo vedere l'effetto relativistico dovuto al moto della Terra, ho bisogno di un orologio che sia affidabile meglio del centesimo di secondo; se voglio vedere gli effetti relativistici legati alle forze gravitazionali (il cosiddetto redshift gravitazionale) mi ci vuole un orologio molto molto migliore. Non c'è un criterio unico: bisogna vedere a quale scopo, che cosa voglio vedere, che cosa m'interessa rivelare.

Ciò non toglie che tra i diversi orologi c'è una gerarchia. Dal punto di vista della sensibilità alle accelerazioni, pendoli e clessidre sono un disastro; l'orologio a bilanciere è già meglio; l'orologio a quarzo è meglio ancora. Sottolineo questo: quando vi domandate "ma questo è un buon orologio?" dovete esaminare tutti questi effetti, in particolare dovete tener conto delle accelerazioni.

Perché le accelerazioni c'interessano particolarmente? Perché quando metteremo un orologio in un riferimento accelerato, vorremo sapere che cosa gli succede. Non è la stessa cosa qualunque sia l'orologio. Si potrebbe dire: "usiamo un orologio ideale." Ma gli esperimenti non si fanno con gli orologi ideali: si fanno con orologi veri. Quindi dobbiamo avere qualche indicazione su quello che succede agli orologi reali quando li si mette in un riferimento accelerato.

