

1. Introduzione

Semplice e complesso in fisica

La fisica è un edificio grandioso e complesso, da molti punti di vista. Pensando ai fenomeni che sono oggetto di studio della fisica, si va dalla scala delle particelle a quella dell'Universo (oltre 40 ordini di grandezza, tanto in senso spaziale, quanto temporale). La stessa cosa si può vedere anche in termini di energia: dalle più piccole separazioni dei livelli atomici alle energie in gioco nelle galassie ci sono qualcosa come 80 ordini di grandezza.

Se pensiamo invece alla struttura degli oggetti su cui la fisica indaga, si va da quelli relativamente semplici, come un atomo d'idrogeno, a quelli complessi ma "ordinati", come un cristallo, a quelli insieme complessi e "disordinati", come una stella o un ammasso.

Dal punto di vista della teoria, la fisica assume che la validità delle sue leggi si estenda a tutta la materia, in qualunque epoca e in qualunque parte dell'Universo, e comunque organizzata: vita compresa. Non si tratta di una pretesa aprioristica, ma di una convinzione maturata lentamente nel corso di secoli, grazie ai risultati conseguiti.

In fisica esistono concetti e leggi generali relativamente semplici (spazio, tempo, energia, simmetria, principi di conservazione ...) accanto a concetti e leggi di formulazione e comprensione molto più difficile (il concetto di campo, i principi della meccanica statistica, i concetti "quantistici"). Questa distinzione tra i concetti e le leggi "semplici" e quelli più complessi e però tutt'altro che univoca: accade spesso che idee che appaiono semplici in una prima presentazione, debbano essere rivedute o reinterpretate ai fini della loro inclusione in teorie più comprensive o più avanzate.

Il ruolo della matematica

È praticamente una nozione comune che la matematica costituisce una base indispensabile per qualsiasi discorso fisico. L'origine di questa idea si trova in un classico della storia del pensiero:

"... e forse stima che la filosofia sia un libro e una fantasia d'un uomo, come l'*Iliade* e l'*Orlando furioso*, libri ne' quali la meno importante cosa è che quello che vi è scritto sia vero. Signor Sarsi, la cosa non istà così. La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto." [G. Galilei: *Il Saggiatore*, 1623]

Tralasciando l'interpretazione più strettamente filosofica di questo brano, sta di fatto che la storia dei quasi quattro secoli successivi ha dimostrato la verità del pensiero galileiano. Oggi sappiamo che non solo la matematica è un indispensabile ausilio (uno “strumento”) per il fisico, ma che addirittura molti concetti fisici non sono “pensabili” se non si padroneggia il linguaggio matematico. Possiamo quindi dire che la matematica non è solo uno strumento di calcolo, ma piuttosto uno “strumento di pensiero.” Cercheremo di giustificare questa asserzione nel seguito, tutte le volte che ne capiterà l'occasione.

Però la fisica non si riduce in nessun senso alla matematica: in primo luogo perché deve fare i conti con la realtà (il “grandissimo libro che ci sta aperto innanzi a gli occhi”); ma anche perché spesso pone alla matematica dei problemi da risolvere, o avanza idee nuove — magari in forma grezza e imprecisa — che sorgono dal vivo della ricerca. L'esempio più classico è naturalmente l'invenzione newtoniana del calcolo differenziale, necessario alla meccanica.

Dal punto di vista di chi inizia lo studio della fisica, il problema centrale sta nel riuscire a farsi padroni dello strumento matematico, anziché farsene condizionare. È purtroppo frequente l'errore di sopravvalutare le difficoltà matematiche — che forse sono più appariscenti — e non vedere le difficoltà di natura fisica, che spesso sono più profonde.

Teoria ed esperienza

La fisica è una scienza sperimentale: una frase fatta. In realtà nella fisica c'è un complesso rapporto fra teoria ed esperienza: da un lato, è troppo semplice dire che tutta la teoria fisica nasce dall'esperienza, mentre spesso si tratta, per dirla con Einstein, di una “libera creazione dell'intelletto umano”; dall'altro, l'esperienza resta il solo campo di prova di ogni teoria, che è “tanto indipendente dalla realtà, quanto la forma di un vestito lo è da quella del corpo” (ancora Einstein). Molte volte i fatti sperimentali suggeriscono la prima idea di una teoria, che poi viene sviluppata in forma più articolata, e solo più avanti viene messa di nuovo a confronto con la realtà; ma altre volte gli esperimenti vengono interpretati, o addirittura progettati, in base a teorie preesistenti. Di tutto questo cercheremo di renderci conto su esempi canonici.

La distinzione fra teoria ed esperienza porta di fatto a una certa divisione del lavoro tra i ricercatori, per cui tra i fisici ci sono gli “sperimentali” e i “teorici”; e come è naturale, tra i due campi ci sono differenze di accento e d'interpretazione, controversie a volte serie a volte scherzose . . . ; ma tutti sanno che entrambi sono indispensabili. Una domanda non facile, e che può interessare chi comincia, è: come si sceglie se fare il teorico o lo sperimentale? Non è facile dare una risposta che non sia generica e/o banale; e del resto, che la scelta non sia sempre facile, e neppure univoca, lo dimostrano i casi — non rarissimi — di “cambiamento di campo”: il più famoso è senza dubbio Fermi, che è stato

un grande teorico nella prima parte della sua carriera scientifica, e un grande sperimentale nella seconda parte.

Una questione che angustia molti filosofi e disgusta molti matematici è la seguente: le leggi fisiche sono “approssimate”, “provvisorie”, “relative”. Sembra che ciò significhi che non si può essere sicuri di nulla, che ci si muove sulle sabbie mobili. Naturalmente non è così: tuttavia è vero che le leggi fisiche sono:

- a) approssimate. In parte per l'incertezza dei dati sperimentali, in parte perché non è mai possibile controllare completamente le condizioni in cui si applica una legge.
- b) provvisorie. Perché nuovi risultati possono richiedere correzioni, e l'estrapolazione di una legge a un ambito nuovo quasi sempre ne altera la validità.
- c) relative (1). Occorre sempre definire le condizioni di un esperimento, e una tra queste è il *sistema di riferimento*, del quale ci occuperemo ampiamente; quasi sempre i valori delle grandezze in gioco dipendono dal sistema di riferimento, ma in questo non c'è niente di arbitrario, di soggettivo.
- d) relative (2). In un altro senso si può parlare di leggi relative: a parte i grandi principi, come la conservazione dell'energia, molte leggi hanno in fisica validità limitata a certe condizioni, per es. di densità, o di temperatura. Altro esempio è la propagazione rettilinea della luce, che vale finché si possa trascurare la diffrazione. Anche in questo senso, le condizioni di validità sono ben definite e ripetibili.

Ancora su semplice e complesso

Abbiamo già detto che la fisica si occupa sia di sistemi semplici sia di sistemi complessi; c'è però un principio metodologico, anch'esso dovuto a Galileo, che dice: “comincia dalle cose semplici.” Il primo esempio è la caduta dei gravi, che in presenza di resistenza del mezzo è assai complicata, tanto che appare impossibile estrarne delle leggi. Una volta tolta di mezzo l'aria (o una volta ridottone l'effetto, come fece Galileo col piano inclinato) la legge di caduta emerge chiaramente.

Perciò il fisico ha imparato a non prendere di petto i problemi complessi nel loro insieme, ma a scomporli, a semplificarli, sostituendo alle condizioni in cui i fenomeni si presentano in natura condizioni artificiali, come quelle del laboratorio. Questo modo di procedere viene a volte criticato, come se significasse che il fisico ha perso di vista la realtà nella sua “complessità” (parola oggi di gran moda).

Può benissimo accadere che singoli ricercatori o programmi di ricerca si stacchino dai problemi della realtà esterna, e s'immergano in problemi del tutto “interni” alla loro ricerca; ma questo non ha a che fare col valore conoscitivo della fisica. Ci dovrebbero essere pochi dubbi che i risultati della fisica sono il fondamento di qualsiasi comprensione scientifica della realtà: dalla formazione

delle stelle all'evoluzione della Terra, al comportamento delle molecole biologiche, alle trasformazioni di energia negli esseri viventi... E l'elenco potrebbe allungarsi a volontà.

Oggi si tende a contrapporre la “ricchezza” e la “vitalità” dei sistemi complessi alla fredda semplicità dei supposti oggetti di studio della fisica. Niente di nuovo sotto il sole:

“... quella scienza che coi suoi schemi, le sue formule, le sue leggi, i suoi tracciati, i suoi preparati, i suoi cadaveri e le sue piante disseccate e le sue bestie impagliate è come un mondo di spettri, dove l'anima sente il freddo della morte.” [G. Gentile, *Sommario di pedagogia generale* (Laterza 1923) p. 230]

È vero che ad es. in questo corso ci occuperemo quasi sempre di sistemi molto semplici, ma solo perché questi sono il necessario punto di partenza: se non si capiscono questi, ci si “aggira vanamente in un oscuro laberinto.” Lo studio dei sistemi complessi comincia a diventare praticabile oggi, perché secoli di lavoro ci hanno fornito gli strumenti: concettuali, ma anche materiali. Basta pensare ai calcolatori, e al fatto che questi esistono perché la fisica dei solidi, basata sulla meccanica quantistica, li ha resi possibili.

Fisica classica e fisica “moderna”

Questi termini stanno a distinguere, grosso modo, la fisica prima della crisi di fine '800 da quella sviluppatasi in seguito. Non è certo il caso di negare che la crisi vi sia stata, e abbia influito profondamente sul pensiero dei fisici del '900; tuttavia a distanza di un secolo è forse il caso di notare che cambiamenti non meno profondi vi sono stati anche in seguito, sì che un fisico di 50 anni fa si riconoscerebbe ben poco nella fisica di oggi. Perciò, anche se non è il caso di parlare di nuovo di crisi, sembra ormai anacronistico conglobare tutta la fisica di questo secolo sotto l'unica etichetta di “fisica moderna.”

Qualche esempio aiuterà a cogliere il senso di queste asserzioni. Le sensibilità di tutti gli strumenti della fisica sperimentale sono aumentate di diversi ordini di grandezza:

- Oggi è normale controllare e misurare spostamenti molto più piccoli delle dimensioni atomiche.
- Fino a pochi decenni fa si diceva che l'esistenza degli atomi era sì provata da numerosi fatti sperimentali, ma in modo indiretto; oggi esistono tecniche che permettono di “vedere” gli atomi, e di manipolare atomi singoli o in piccoli numeri.
- Non è passato molto tempo da quando s'insegnava che la luce visibile è un'onda elettromagnetica, ma non è pensabile misurare le variazioni temporali del suo campo, che sono estremamente rapide; oggi si misura direttamente la frequenza della luce laser.

- Dalle prime reazioni nucleari artificiali (anni '30) le energie disponibili sono aumentate di sei ordini di grandezza: di conseguenza la complessità del mondo subatomico si è accresciuta enormemente, e gli schemi teorici — anche se tutt'altro che definitivi — sono lontanissimi da quelli che si potevano concepire subito dopo l'invenzione della meccanica quantistica.
- Discorso molto simile si può fare all'altro estremo della scala: negli anni '20 era ancora dubbio che cosa fosse una galassia, e non si sapeva praticamente nulla della struttura delle stelle: oggi il quadro è del tutto diverso; e lo stesso si può dire in materia di cosmologia.

È poi molto difficile valutare appieno quanto la disponibilità di mezzi di calcolo sempre più potenti abbia influito non solo sulle possibilità teoriche e sperimentali dei fisici, ma anche sul loro stesso modo di pensare, di affrontare i problemi.

Si può obiettare che tutto questo è vero, ma non ha cambiato le leggi fondamentali nate dalla rivoluzione dei primi del '900: la relatività ha ricevuto conferme sempre più estese e precise; la meccanica quantistica è stata e continua ad essere discussa, ma non si sono trovati fatti che ne confutino la validità, ecc. È per queste ragioni che dicevamo sopra che non si può parlare di crisi, ma di trasformazione graduale eppure assai profonda. La mancanza di momenti di rottura ha avuto l'effetto che la trasformazione può essere rimasta meno avvertita; ma basterebbe prendere in mano un qualsiasi libro (o più ancora una rivista) di 50 anni fa, per cogliere la distanza che ci separa da allora.

L'interazione fra scienza e tecnica

Questo tema è stato già toccato indirettamente, ma è il caso di completare il discorso. Si tratta infatti di una caratteristica già presente nel secolo scorso, ma che in questo secolo ha preso uno sviluppo assai più ampio.

L'interazione è in due versi: da un lato c'è quella, ben nota, dalla scienza verso la tecnica. Abbiamo già accennato ad es. all'influsso che ha avuto la fisica dei solidi sull'elettronica miniaturizzata; ma si potrebbe citare l'ottica teorica e pratica per le applicazioni alla fotografia ecc.; i rapporti tra la meccanica statistica e le tecniche di trasmissione ed elaborazione delle informazioni; e così via.

È invece meno riconosciuto, ma non meno evidente, l'influsso inverso: della tecnica sullo sviluppo scientifico. Questo si attua soprattutto nella disponibilità di strumenti più sensibili, più affidabili, più complessi; ma anche per altre vie. Per es. lo sviluppo delle tecniche radar, per scopi inizialmente militari, ha consentito la nascita della spettroscopia a microonde, che ha arricchito in modo imprevedibile la fisica atomica e molecolare. Oppure si pensi al beneficio ottenuto per la fisica dello spazio e per l'astrofisica, dallo sviluppo dei satelliti artificiali e delle sonde spaziali, la cui base tecnica aveva ed ha motivazioni diverse: telecomunicazioni o sistemi militari.

I capitoli della fisica

La fisica è tradizionalmente divisa in capitoli: meccanica, termodinamica, elettromagnetismo, ottica ... (e altrettanto tradizionalmente il corso di Fisica Generale I tratta i primi due di questi). La suddivisione ha prima di tutto radici storiche, e poi anche di connessione logica: così ad es. la meccanica (classica) è stata la prima parte della fisica ad assumere un assetto teorico compiuto, ed è perciò considerata logicamente indipendente dal resto. Vedremo nel seguito del corso che in realtà ciò non è del tutto vero; ma lo è abbastanza per giustificare l'ordine tradizionale, nel senso che le dipendenze degli altri capitoli dalla meccanica sono decisamente più forti. Un'altra ragione per cominciare dalla meccanica è che la materia trattata rimane più vicina all'esperienza comune, e quindi richiede un minore sforzo di astrazione, e permette un più facile riferimento ai fatti. Del resto questa è probabilmente la ragione per cui essa è nata per prima.

Abbiamo già osservato che anche concetti apparentemente semplici acquistano una maggiore complessità man mano che si procede nello studio; un esempio è certamente il concetto di energia, che già in questo corso cambierà carattere nel passaggio dalla meccanica alla termodinamica. Sempre a proposito di energia, alla fine del corso di laurea avrete visto molti altri aspetti che ne fanno uno dei grandi "concetti unificanti" della fisica; noi non potremo anticipare tutto questo, ma la consapevolezza che l'energia è qualcosa di più complesso di quanto potrebbe apparire dalla semplice definizione meccanica sarà presente fin dall'inizio.

Le grandi unificazioni

Con l'ultima osservazione abbiamo inteso sottolineare un punto importante: *la fisica è una* (e in realtà non solo la fisica!) e le suddivisioni sono soltanto una nostra esigenza, che non deve farcene perdere di vista la fondamentale unità. È bene abituarsi fin dall'inizio a non ragionare a "compartimenti stagni" (cosa incoraggiata dall'esistenza di tanti esami distinti): saper distinguere e poi saper riunire sono attitudini entrambe necessarie per fare un buon fisico.

Anche nella storia della fisica troviamo entrambi questi momenti. Già la fondazione della meccanica si basa su di una fondamentale distinzione: il problema del moto va separato da altri aspetti dei fenomeni; non importa che colore ha l'oggetto che si muove, se sia animato o inanimato, ecc. Se non si fa così, non si capisce niente. Però è immediata la prima grande unificazione: quella fra "cielo" e "terra." Già Galileo afferma con forza questa idea, ad es. quando rivendica il diritto e l'utilità di studiare la Luna con le stesse categorie scientifiche adottate per gli oggetti terrestri; o quando afferma che se il cannocchiale è affidabile per vedere le navi che stanno per entrare nel porto di Venezia, lo è anche quando gli fa scoprire i satelliti di Giove. Sulla stessa strada si muove

Newton, quando identifica la causa che fa cadere i gravi sulla Terra, con quella che determina il moto della Luna e dei pianeti.

Altri esempi storici di grandi unificazioni possiamo citare brevemente: Maxwell completa la teoria dell'elettromagnetismo, prevede l'esistenza delle onde elettromagnetiche, afferma che anche la luce è un'onda elettromagnetica: unificando così elettromagnetismo e ottica. Lo stesso Maxwell e poi Boltzmann interpretano i fenomeni della termodinamica come aspetti macroscopici di moti microscopici (allora del tutto invisibili): inaugurando con ciò il processo di unificazione fra meccanica e termodinamica, che per certi aspetti non è ancora concluso. Einstein riconduce la gravitazione newtoniana a una generalizzazione della sua relatività. In tempi assai più recenti si parla di unificazione delle interazioni fondamentali; argomento che va molto al di là di questo corso, e sul quale è ancora difficile dire una parola definitiva.

2. Metrologia del tempo

Col termine “metrologia” si designano le tecniche di misura delle grandezze fisiche: strumenti, procedure di misura, cause di errore, ecc. La metrologia è una branca della fisica di grande importanza, sia nella fisica sperimentale, sia in numerose applicazioni tecniche; dalla metrologia dipendono anche le scelte sulle unità di misura.

Qui dovremo limitarci solo a cenni brevi e sommari, anche perché la metrologia di tutte le grandezze fisiche — incluse quelle spaziali e temporali — coinvolge molte conoscenze di parti più avanzate della fisica, di cui noi non possiamo fare uso. Tuttavia non sarebbe opportuno ignorare del tutto l'argomento, perché è bene aver chiaro fin dall'inizio che anche le idee fisiche che possono sembrare più elementari e intuitive sono in realtà il frutto di un'elaborazione complessa, nella quale accanto alle teorie hanno avuto parte anche le tecniche e gli strumenti.

Gli inizi

La misura del tempo comincia col moto apparente del Sole, dal quale derivano le prime unità: giorno, ora e frazioni, anno, ecc. Ma ci si accorge presto che il *tempo solare apparente* non è uniforme: una meridiana scarta ± 15 min nel corso dell'anno. Una domanda viene naturale: *come* ci si accorge di questo? La risposta in linea di principio è semplice: bisogna avere un altro orologio, che segni un tempo uniforme; in pratica, entrare in dettagli ci porterebbe troppo lontano.

Sta di fatto che si è scoperto presto un orologio più uniforme: il moto della sfera celeste (*tempo siderale*), che è il riflesso della rotazione diurna della Terra. Fino a epoche abbastanza recenti il TS è stato l'orologio di riferimento per tutta la metrologia del tempo: si usava (e si usa ancora, per le necessità pratiche) il *tempo solare medio*, che rappresenta — detto in termini semplici — un tempo basato sulla scala del giorno solare di 24 ore, ma regolato in base a una relazione precisa col TS, che è quello che effettivamente si determina negli osservatori astronomici.

Solo negli anni '30 si sono scoperte oscillazioni periodiche (e si sono sospettate irregolarità secolari) della rotazione terrestre. Dicendo “periodiche” intendiamo variazioni che si ripetono con regolarità (nel nostro caso, con periodo vicino a un anno); il termine “secolari” indica invece variazioni lente, senza un periodo definito, e forse anche con andamento casuale, ma che si accumulano nel tempo (nel corso di secoli). Per accorgersi di tutto questo occorre, al solito, disporre di altri orologi, sufficientemente “buoni”: in concreto si è trattato dapprima di orologi a pendolo, e poi dei primi orologi elettronici al quarzo (che non erano da polso, ma occupavano un laboratorio!)

L'ordine di grandezza delle oscillazioni periodiche nella rotazione terrestre è di qualche centesimo di secondo; quello delle variazioni secolari ammonta a circa un minuto dall'inizio di questo secolo.

Che cos'è un orologio "giusto"?

Per affrontare questo problema ci conviene partire da una storiella: gli orologi di Zanzibar.

Molti anni fa, quando non esisteva ancora la radio, il capitano di una nave si accorse che il cronometro di bordo si era fermato. Il fatto era grave, perché a quei tempi un orologio era necessario per "fare il punto," ossia per determinare la posizione della nave. Fece perciò rotta sull'isola di Zanzibar, che non era lontana, pensando di trovare a terra degli orologi su cui rimettere quello della nave.

Una volta sbarcato, chiede informazioni, e gli dicono che in città c'è un vecchio orologiaio che possiede un orologio molto preciso. Va da lui, col suo cronometro, e lo regola su quello dell'orologiaio. Poi, per scrupolo, gli chiede come faccia a essere sicuro del suo orologio. Il vecchio risponde: "Stia tranquillo: tutti i giorni lo controllo col cannone della guardia costiera, che spara a mezzogiorno esatto."

Il capitano saluta l'orologiaio e se ne torna al porto. Arrivato lì, gli capita d'incontrare il comandante della guardia costiera, e per eccesso di zelo gli chiede come faccia a segnalare il mezzogiorno esatto. Il comandante risponde che loro hanno un buon orologio, adibito allo scopo. Il capitano insiste: "Ma come fate a sapere che sia proprio esatto?" Risposta: "È semplice, giù in città c'è un vecchio orologiaio che ..."

Dunque: se abbiamo due orologi che non vanno d'accordo, come facciamo a sapere quale va bene? e se vanno d'accordo, come possiamo essere sicuri che siano giusti? Il problema sembra insolubile sul piano logico.

Per essere concreti, pensiamo a quei pendoli che hanno mostrato le oscillazioni della rotazione terrestre: come facciamo a sapere che non sono i pendoli a sbagliare? Il fatto è che non abbiamo un solo pendolo, ma molti, costruiti da diversi tecnici e situati in laboratori nei più svariati angoli del mondo. Se possiamo constatare, confrontandoli via radio, che essi vanno d'accordo tra loro molto più che con l'orologio Terra, è ragionevole attribuire la colpa del disaccordo alla Terra, perché non sapremmo trovare nessuna spiegazione razionale al fatto che i pendoli sbagliano tutti insieme.

Ma c'è di più: una volta attribuita l'irregolarità alla Terra, ne cercheremo le cause. Oggi sappiamo che queste stanno in parte nel carattere del movimento stesso della Terra (il cosiddetto "moto del Polo"), in parte in effetti stagionali: formazione e fusione dei ghiacci polari, correnti oceaniche, e simili. Per quanto riguarda gli effetti secolari, si ritiene che una parte dominante abbiano gli "attriti di marea," ossia la dissipazione di energia legata agli spostamenti delle masse d'acqua causate dalle maree. Abbiamo dunque da un lato degli effetti osservati, e dall'altro delle spiegazioni teoriche accettabili (almeno nell'ordine di grandezza). Gli abitanti di Zanzibar non erano in queste condizioni!

Gli sviluppi più recenti

Una volta accertato che l'orologio Terra non era uniforme, non restava che sostituirlo con un altro. Pendoli e quarzi andavano bene a breve termine, ma non erano affidabili su intervalli di diversi anni; perciò si doveva ancora ricorrere a un orologio astronomico. Nel 1955 il TS è stato rimpiazzato dal *tempo delle effemeridi* (TE), che si basa sul moto della Luna e dei pianeti.

Il concetto che sta alla base del TE è il seguente: le leggi di Newton e la legge di gravitazione permettono di determinare il moto dei pianeti (tenendo conto anche delle reciproche interazioni, e con tutta la precisione necessaria, grazie agli attuali calcolatori) in funzione di un'unica variabile indipendente t , che è il “tempo assoluto” di Newton. Perciò la determinazione astronomica della posizione di un pianeta implica una determinazione di t : basta consultare l’“effemeride” del pianeta, ossia una tabella delle sue posizioni calcolate a tempi diversi. È stato il TE a dare la prova definitiva che la rotazione terrestre risente di perturbazioni secolari.

Nota: All'epoca dell'adozione del TE la relatività esisteva già da 50 anni, ma venne considerata irrilevante; non si può escludere un certo scetticismo, ma è anche vero che gli effetti relativistici — come vedremo in seguito — non erano apprezzabili con gli orologi di cui si disponeva allora (mentre cominciano a esserlo oggi).

Nello stesso anno 1955 viene realizzato il primo orologio atomico, ma occorre ancora qualche tempo (necessario per fare esperienza sull'affidabilità del nuovo strumento) perché esso assuma la funzione di standard. Questo accade nel 1967: il secondo viene definito non più su base astronomica, ma in relazione alla frequenza di una determinata radiazione dell'orologio atomico al ^{133}Cs . Precisamente, il secondo è definito in modo che quella radiazione abbia frequenza 9 192 631 770 Hz. Nasce così il *tempo atomico*, più avanti formalizzato in TAI (tempo atomico internazionale), che è lo standard oggi in uso, e basato su di una serie di *campioni primari*: orologi al Cs funzionanti in diversi laboratori nel mondo.

Più di recente (1984) si è deciso di tener conto, nella definizione delle scale di tempo, degli effetti relativistici dovuti al moto della Terra, che producono oscillazioni periodiche inferiori a ± 2 ms. Questo dà un'idea delle precisioni ottenibili in misure di tempo anche su intervalli dell'ordine di un anno.

A questo punto il tempo astronomico è stato detronizzato: non è più lo standard del tempo uniforme. Ma ciò rende possibile formulare un problema: il TE va d'accordo col TA? O in altre parole: il tempo della meccanica macroscopica coincide col tempo della meccanica atomica? Le ricerche sono ancora in corso: vi sono stati in passato annunci di deviazioni osservate, ma non sono stati confermati.

Perché si cambiano i campioni?

È forse opportuna una breve riflessione su quello che abbiamo visto, per rispondere alla domanda del titolo. I primi passi (dal tempo solare al tempo siderale, da questo al tempo delle effemeridi) sono giustificati dalla scoperta che i vecchi orologi sono risultati non uniformi, ma anche dalla ricerca di campioni sempre più legati a fenomeni semplici e fondamentali: in questo senso ad es. il moto dei pianeti è più semplice e fondamentale della rotazione terrestre, che è influenzata da troppi fattori variabili e difficilmente prevedibili.

Il passaggio dal TE al TA ha invece motivazioni un po' diverse, visto che nessuno ha ancora dimostrato che il TE non è uniforme. Da una parte, c'è il fatto che il TA è legato a fenomeni ancora più semplici e fondamentali di quelli su cui si basa il TE: si tratta infatti dell'emissione e assorbimento di radiazione elettromagnetica da parte di singoli atomi; la frequenza della radiazione è caratteristica di quegli atomi, ed è pochissimo perturbata da influenze esterne, che comunque sono sotto controllo dello sperimentatore. Inoltre lo strumento (orologio atomico) è facilmente riproducibile in ogni parte del mondo, il che permette di disporre di molti campioni indipendenti, che possono essere confrontati tra loro.

Una seconda ragione è che le determinazioni di tempo basate sul TE sono laboriose: richiedono accurate osservazioni astronomiche, lunghi calcoli, ecc.; insomma non si può ricorrere al TE per sapere che ora è in ogni momento! Al contrario, un orologio atomico è un apparato elettronico, la cui uscita è una successione di segnali — per es. intervallati di un secondo — che possono essere trasmessi via radio a chiunque sia interessato a riceverli. Di fatto, anche i segnali orari della radio e della televisione provengono da uno di questi orologi.

Una terza ragione infine sta nella maggiore precisione raggiungibile. Le determinazioni del TE hanno errori sperimentali dell'ordine del millisecondo, mentre gli orologi atomici sono superiori per circa tre ordini di grandezza.

2a. Fisica del tempo

La metrologia del tempo, di cui abbiamo parlato nel capitolo precedente, non può essere isolata dalle idee fisiche sul tempo, che ne stanno alla base. In effetti, alla domanda “che cos’è il tempo?” il fisico preferisce rispondere mostrando come lo si misura.

Il tempo assoluto

Le concezioni del tempo in epoche antiche non sono sempre state simili a quelle che abbiamo oggi; ma la metrologia del tempo, almeno in epoca scientifica, e con l’eccezione dei tempi più recenti, si è sempre basata sulla concezione newtoniana del *tempo assoluto*. Nell’opera somma di Newton, i *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* del 1687, si stabilisce il carattere *assoluto* dello spazio e del tempo (e perciò anche del moto). Il termine “assoluto” è la traduzione letterale del latino *absolutus*, che vuol dire “sciolto da legami,” libero: come dice Newton “senza relazione ad alcunché di esterno.”

L’idea di tempo assoluto è per noi del tutto naturale, tanto che occorre un notevole sforzo per superarla, ossia per imparare a vederla come un’approssimazione — più che adeguata per la vita pratica e anche per buona parte della fisica — di una realtà più complessa. Il tempo esiste indipendentemente dalle cose e dalle persone, e “scorre uniformemente” (parole di Newton); è lo stesso in ogni luogo.

Questa visione del tempo si manifesta oggi negli aspetti più ovvi della vita quotidiana: tutti portiamo degli orologi, che se sono buoni debbono andare d’accordo; tutti li regoliamo coi segnali orari della radio o della TV. Quando dobbiamo prendere il treno consultiamo l’orario ferroviario, che ci dice a che ora il nostro treno parte e a che ora arriva (o dovrebbe arrivare); se all’arrivo ci aspetta un amico, gli telefoniamo per prendere appuntamento alla stazione, ecc. Il fatto che esistano diversi fusi orari non è una negazione dell’idea di tempo assoluto, anzi: noi diciamo “qui sono le 13, ma *ora* a New York sono le 7 di mattina” e con questo distinguiamo la *convenzione* sulle diverse ore locali — legata al fatto che la Terra è rotonda e quindi il Sole non sorge e non tramonta contemporaneamente in tutti i luoghi — dalla *realtà* sottostante, espressa dall’avverbio “ora” (in questo stesso istante): possiamo parlare di uno stesso istante di tempo assoluto qui e a New York; e perfino su Marte, se ci potesse servire.

Sarebbe interessante discutere come tale concezione del tempo si sia formata e imposta agli scienziati, ai filosofi e al senso comune; ma questo ci porterebbe troppo fuori strada. Limitiamoci a osservare che si tratta di un prodotto storico legato oggi anche all’esistenza di mezzi di comunicazione e di trasporto che ci permettono di pensare “simultaneamente” ai più diversi punti del nostro pianeta. Un esempio di drammatica attualità è stata la “guerra del Golfo in diretta,” cui tutti abbiamo potuto assistere nei primi mesi di questo 1991.

La matematizzazione del tempo

Per matematizzazione di un concetto fisico s'intende la sua traduzione in una struttura matematica adeguata a rappresentarne le proprietà note: si tratta cioè della realizzazione del programma di Galileo: "... questo grandissimo libro ... è scritto in lingua matematica ..."

La matematizzazione del tempo nella fisica newtoniana è semplice: il tempo ha la struttura della *retta reale* \mathbf{R} . Si deve notare che in questa breve asserzione sono contenute diverse proprietà del tempo fisico, non tutte completamente ovvie:

- in primo luogo il tempo è infinitamente esteso nei due sensi, non ha né principio né fine
- il tempo non ritorna su se stesso (come farebbe una curva chiusa, e come alcune correnti di pensiero e alcune culture hanno supposto o ancora credono)
- il tempo ha un *verso*, un orientamento: non si può tornare indietro; di questo ripareremo alla fine del corso
- il tempo è *unidimensionale*, a differenza dello spazio (e ci riesce impossibile immaginare come si potrebbe pensare diversamente)
- il tempo "non si dirama," come nella metafora borgesiana del "sentiero dei giardini che si biforcano": siamo tutti immersi nello stesso tempo
- il tempo è un *continuo*: questa è l'idea più astratta, la cui prima formulazione cosciente risale a Galileo, e di cui non è facile dare prove sperimentali.

Si è fatto notare tutto ciò per mettere in evidenza che la matematizzazione di un concetto fisico lo definisce in modo preciso, talora ben al di là delle basi sperimentali disponibili: è dunque una "ipotesi di lavoro," che andrà messa alla prova delle conseguenze che ne derivano, e del confronto con tutti i fatti sperimentali che vi sono collegati. Non ci si deve perciò meravigliare se lo sviluppo della fisica porta in certi casi a rivedere alcune scelte che una lunga abitudine aveva fatto credere le sole possibili, com'è appunto accaduto con il tempo agli inizi di questo secolo.

Il tempo nella fisica moderna

Ci chiediamo: in che senso la fisica del ventesimo secolo ha modificato la visione del tempo propria della fisica classica?

La risposta ha due parti: una riguarda il tempo su scala macroscopica e addirittura cosmologica; l'altra concerne il tempo nel microscopico. Per la prima parte, è ben noto che la revisione concettuale è stata introdotta dalla relatività; ad essa dedicheremo una certa attenzione nel seguito, per cui non occorre ora insistere. Resta da dire qualcosa sulla seconda parte: qui abbiamo a che fare con la meccanica quantistica e le recenti teorie dei campi.

Ebbene, per quanto possa sembrare strano, da questo punto di vista non c'è stato nessun cambiamento sostanziale, a parte il fatto che le teorie citate sono relativistiche: dunque il tempo nel microscopico non ha, per quanto ne sappiamo, proprietà diverse da quelle che permettono di spiegare i fenomeni macroscopici. Anzi le cose sono anche più semplici, in quanto a livello microscopico gli effetti gravitazionali sono trascurabili, per cui il tempo è quello della relatività ristretta.

Vi sono state, e vi sono tutt'oggi, proposte di strutture diverse dello spazio-tempo, tentativi d'interpretare le particelle come manifestazioni nello spazio-tempo 4-dimensionale di una struttura geometrica più complicata; sono inoltre in attivo svolgimento ricerche tendenti a unificare la teoria quantistica dei campi con la relatività generale: ma non sono ancora stati raggiunti risultati che permettano di parlare di un superamento dell'idea di tempo valida nella fisica macroscopica.

Due esperimenti moderni

Vogliamo concludere questo capitolo guardando più da vicino la rivoluzione prodotta dalla relatività di Einstein nella concezione newtoniana del tempo. L'argomento qui introdotto è sviluppato più a fondo nel libro *Per un insegnamento moderno della relatività*, che abbrevieremo *Rel*.

Per comprendere la concezione relativistica del tempo conviene descrivere due esperimenti moderni, che presentano la situazione con particolare evidenza. Il primo dei due è l'esperimento di Hafele e Keating (HK: 1971).

L'esperimento HK si dice in poche parole: è consistito nel portare degli orologi atomici intorno alla Terra, l'uno in senso orario, l'altro in senso antiorario (uno verso Est, l'altro verso Ovest), semplicemente caricandoli su normali aerei di linea. Schematizziamo: gli orologi partono dall'aeroporto A (fig. 2a-1); l'orologio 1 gira in senso antiorario, l'orologio 2 in senso orario. Il fatto essenziale è che quando ritornano in A, l'intervallo di tempo τ_2 segnato dall'orologio 2 è maggiore di quello τ_1 segnato dall'orologio 1. Nell'esperimento reale il viaggio durava circa 50 ore, e la differenza fra i due tempi è risultata un po' maggiore di $300 \text{ ns} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$.

Passiamo ora al secondo esperimento, che qui descriveremo nella versione di Briatore e Leschiutta (BL: 1975). C'è un orologio atomico a Torino, a 250 m sul livello del mare, e un altro sul Plateau Rosà, nel gruppo del Cervino, quindi molto più in alto (fig. 2a-2). L'esperimento consiste di nuovo nel vedere se i due orologi vanno d'accordo; solo che adesso essi sono fermi uno rispetto all'altro. Il confronto si fa trasmettendo segnali orari da 1 a 2 per un certo tempo; in altre parole l'orologio 1 emette segnali — ad es. ogni secondo — e in 2 c'è un ricevitore che conta i segnali che riceve e li confronta con quelli dell'orologio 2. Dopo un certo tempo ci si accorge che i segnali emessi dall'orologio di Torino e ricevuti in 2 non vanno d'accordo con quelli dell'orologio sulla montagna. Il

divario, in 68 giorni, è di $2.4 \mu\text{s}$: nel senso che l'orologio 2 risulta avanti di questo tempo rispetto ai segnali provenienti da 1.

Osservazione 1: Entrambi gli esperimenti fanno uso di orologi atomici. È questa la ragione per cui gli esperimenti sono stati fatti solo vent'anni fa: occorre che orologi così raffinati fossero non solo disponibili, ma anche in una forma facilmente trasportabile.

Osservazione 2: Valutiamo l'ordine di grandezza degli effetti di cui stiamo parlando. Nell'esperimento HK si tratta di $3 \cdot 10^{-7}$ s su una durata totale di $1.8 \cdot 10^5$ s, per uno scarto relativo di $\sim 10^{-12}$; in quello BL abbiamo $2.4 \cdot 10^{-6}$ s su $6 \cdot 10^6$ s, che dà uno scarto relativo di $4 \cdot 10^{-13}$. Gli scarti sono piccolissimi (e solo gli orologi atomici possono rivelarli) e quindi sono del tutto trascurabili nella maggior parte delle situazioni, non solo della vita pratica, ma anche della fisica di laboratorio.

Non vogliamo qui discutere a fondo i due esperimenti (si veda per questo *Rel*) e riportiamo solo la conclusione. Non è possibile attribuire il divario tra i due orologi a difetti di funzionamento, né a influenze esterne: in altre parole, gli orologi atomici possono essere trattati come orologi ideali (più esattamente, il loro scostamento dall'ideale è ben noto e controllato). Quindi se nell'esperimento HK essi, partiti d'accordo, ritornano segnando tempi diversi, *non si può più parlare di tempo assoluto*. È una conclusione difficile da accettare, ma ancor più difficile da sfuggire.

Allo stesso modo, l'esperimento BL ci mostra che nel campo gravitazionale della Terra *c'è una relazione fra tempo e spazio*, che per ora non sappiamo come descrivere, ma che di nuovo ci mostra come la matematizzazione newtoniana del tempo non rappresenti in maniera del tutto precisa la realtà.

L'estrema piccolezza degli effetti osservati da un lato spiega perché questi siano sfuggiti per tanto tempo allo studio dei fisici; ma dall'altro lato ci autorizza a dimenticarne l'esistenza, fin quando non ci si trovi in situazioni particolari, che si possono così riassumere:

- corpi in moto a grande velocità
- campi gravitazionali intensi.

S'intende che “grande” e “intenso” dipendono dalla sensibilità degli strumenti di misura in uso, ovvero dai limiti di accuratezza con cui vogliamo descrivere i fenomeni. Una discussione più approfondita del problema non è semplice, e a questo punto sarebbe anche prematura.