

## Capitolo 1

# Il tempo come variabile da Galileo alla Relatività di Einstein

Antonella Vannini<sup>1</sup>

### 1.1 Introduzione

Il concetto di tempo e il concetto di causalità sono sempre stati al centro di quel “fare scienza” che distingue gli esseri umani dalle altre forme di vita: ma come si sono evoluti questi concetti nel corso dei secoli?

Galileo e Newton sono stati i grandi teorizzatori di quella che potremmo chiamare “causalità meccanica”, secondo la quale tutti i fenomeni osservabili nell’universo hanno una causa posta nel passato che li determina e li rende riproducibili, ovvero *causabili*, in laboratorio. Questo tipo di causalità, ovviamente, è legata alla concezione, a noi estremamente familiare, secondo la quale il tempo scorre in modo lineare dal passato al futuro: il verso del tempo è obbligato, ciò che è passato è ormai alle nostre spalle, mentre ciò che si pone nel futuro non è ancora avvenuto. Questa visione ha dato l’avvio al metodo sperimentale che, con successo, è stato applicato allo studio non solo dei sistemi meccanici, ma anche dei sistemi viventi. Lo scopo principale del metodo sperimentale è infatti quello di evidenziare i rapporti di causalità tra gli eventi: in esso, le variabili della ricerca vengono controllate in modo tale da mettere in luce in modo specifico i rapporti di causa-effetto (Poli, 1994).

I progressi scientifici ottenuti in fisica a partire dalla fine del XIX secolo hanno però costretto a rivedere questa immagine usuale dello scorrere del tempo. Il punto di partenza di questo processo è rappresentato dalle famose equazioni note come “trasformazioni di Lorentz”, che legano il tempo alla velocità, e dalle quali è nata la teoria della relatività ristretta di Albert

---

<sup>1</sup> [antonella.vannini@gmail.com](mailto:antonella.vannini@gmail.com)

Einstein (Einstein, 1916). Einstein sviluppò la teoria della relatività ristretta allo scopo di allargare la validità del principio di relatività di Galilei a tutti i fenomeni fisici, in particolare anche a quelli elettromagnetici. La teoria della relatività si basa sulla costanza della velocità della luce. Fra le sue conseguenze più importanti ci sono la ridefinizione dei concetti di spazio e tempo, come pure la scoperta dell'equivalenza fra massa ed energia. Il concetto di tempo assoluto viene a cadere, essendo il tempo relativo al sistema di riferimento nel quale esso viene misurato: questo significa che due eventi simultanei in un certo sistema di riferimento non lo sono più in un altro, perché il tempo scorre in maniera diversa nei diversi sistemi di riferimento (Einstein, 1916).

## **1.2 Origini del modello meccanicista nella scienza: l'universo newtoniano e l'uomo-macchina**

Nel corso del Cinquecento e del Seicento prese l'avvio quel monumentale processo di rivoluzione scientifica che, travolgendo completamente la concezione medievale dell'uomo e del cosmo, determinò la visione del mondo ed il sistema di valori che sono tutt'oggi alla base della nostra cultura. La rivoluzione scientifica ebbe inizio con le osservazioni astronomiche di Niccolò Copernico (1473-1543), che rovesciarono la concezione geocentrica allora diffusa, rappresentata dal sistema aristotelico-tolemaico (Capra, 1992).

Il sistema aristotelico-tolemaico fu enunciato da Aristotele nel IV secolo a.C. e perfezionato da Tolomeo nel II secolo d.C. Secondo questo sistema, la Terra era immobile al centro dell'universo, con il Sole, la Luna, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno che ruotavano attorno ad essa in orbite circolari via via maggiori. Le sfere dei pianeti erano circondate dal cielo delle stelle fisse (un cielo per ogni pianeta), che ruotava grazie all'impulso del Primo Mobile (il nono cielo, velocissimo e privo di stelle). Il movimento del nono cielo era diretta espressione dell'azione di Dio.

In contrapposizione al sistema aristotelico-tolemaico, il nuovo sistema eliocentrico proposto da Copernico poneva il Sole al centro dell'universo, facendone il centro dei moti di rivoluzione dei pianeti. Il sistema, che rappresentò una grande innovazione in campo astronomico, può essere così schematizzato: partendo dal centro troviamo il Sole attorno a cui ruotano

Mercurio, Venere, Terra (attorno alla quale ruota la Luna), Marte, Giove, e Saturno. Le sfere dei vari pianeti, allora conosciuti, erano racchiuse dalla sfera delle stelle fisse, che, secondo Copernico, era immobile.

A Copernico fece seguito Giovanni Keplero (1571-1630), scienziato e mistico che, attraverso un faticoso lavoro sulle tavole astronomiche, poté enunciare le tre leggi del moto planetario:

- 1) tutti i pianeti descrivono attorno al Sole delle orbite di forma ellittica. Il Sole occupa uno dei due fuochi, comune a tutte le ellissi;
- 2) il raggio vettore copre aree uguali in tempi uguali;
- 3) il quadrato dei periodi di rivoluzione dei pianeti è proporzionale ai cubi dei semiassi maggiori delle loro orbite.

Ciò fornì ulteriore sostegno al modello eliocentrico copernicano.

Il vero mutamento nell'opinione scientifica, tuttavia, fu opera di Galileo Galilei (1564-1642). Utilizzando il telescopio, di recente invenzione, Galileo si dedicò ad attente osservazioni astronomiche giungendo a togliere ogni credito all'antica cosmologia ed avvalorando l'ipotesi copernicana come teoria scientificamente valida (Galilei, 1979). Gli aspetti fondamentali dell'opera di Galileo – la sua impostazione empirica e la descrizione matematica della natura – si posero alla base della nuova scienza del Seicento e rimangono tutt'oggi criteri basilari nelle moderne teorie scientifiche. Il grande contributo offerto da Galileo risiede, infatti, nella combinazione della sperimentazione scientifica con il linguaggio matematico per formulare le leggi della natura da lui scoperte: per questo, egli viene considerato il padre della scienza moderna. Allo scopo di permettere una descrizione matematica della natura, il metodo di Galileo si fondò sullo studio delle proprietà fondamentali dei corpi materiali, quelle che potevano essere misurate e quantificate.

Negli stessi anni in cui Galileo escogitava i suoi ingegnosi esperimenti, Francesco Bacone (1561-1626) formulava esplicitamente il metodo empirico nella scienza. Bacone giunse ad una formulazione chiara del procedimento induttivo compiendo esperimenti e derivandone conclusioni generali, da verificare in ulteriori esperimenti: egli divenne uno strenuo sostenitore di questo nuovo metodo d'indagine scientifica, attaccando coraggiosamente le scuole di pensiero tradizionali fondate sul *metodo deduttivo* aristotelico. Il metodo deduttivo parte da *postulati*, cioè verità che non sono soggette a verifica, da cui discendono, attraverso il

ragionamento logico (il sillogismo), una serie di conseguenze; al contrario, il *metodo induttivo* proposto da Galileo e Bacone consiste in un processo di astrazione che consente di trovare una regola generale partendo da pochi dati particolari.

Con Galileo e Bacone nasce dunque il *metodo scientifico*, un indirizzo che intende separare l'osservatore dall'oggetto osservato e costruire una prospettiva neutrale per lo sviluppo della conoscenza oggettiva. E' da sottolineare che lo "spirito baconiano" trasformò completamente la natura ed i fini della ricerca scientifica (Rifkin, 1982). Sin dall'Antichità la scienza aveva perseguito la sapienza, la comprensione dell'ordine naturale ed una vita in accordo con essi, e l'atteggiamento dello scienziato era essenzialmente, come diremmo oggi, "ecologico"; da Bacone in poi, il fine della scienza si radica nella ricerca di un controllo sempre più profondo sulla natura e nello sviluppo di una "conoscenza oggettiva" che, nelle parole di Bacone stesso, avrebbe permesso all'uomo di prendere il "comando sulle cose naturali, sui corpi, sulla medicina, sulle forze meccaniche e su infinite altre cose di questo tipo" (Rifkin, 1982). In tale visione, lo scopo dello scienziato era dunque quello di controllare la natura: siamo ormai lontani dal concetto antico della "Madre terra", ed esso verrà completamente stravolto quando la rivoluzione scientifica sostituirà la concezione organica della natura con la metafora del mondo come macchina ad opera di due delle menti più feconde del Seicento, Cartesio e Newton.

Come Galileo, Cartesio (1596-1650) era convinto che il "libro della natura" fosse scritto in caratteri matematici, ed il suo grande progetto fu di ridurre tutti i fenomeni fisici a rapporti matematici esatti. Egli ridusse tutta la natura a semplici questioni di moto, nelle quali solo lo spazio, la posizione e il movimento avevano importanza: "Datemi posizione e movimento", diceva, "e vi costruirò l'universo" (Rifkin, 1982). Tra i maggiori contributi offerti da Cartesio ricordiamo il *metodo analitico di ragionamento*, in base al quale i pensieri e i problemi vengono scomposti in frammenti e disposti nel loro ordine logico. Tale metodo è alla base del moderno pensiero scientifico e si è rivelato utilissimo non solo nello sviluppo delle teorie scientifiche ma anche nella realizzazione di progetti tecnologici complessi. Alla base della concezione cartesiana della natura troviamo il fondamentale dualismo tra due regni indipendenti e separati: quello dello spirito, o *res cogitans*, la "sostanza pensante" e quello della materia, o *res extensa*, la "sostanza estesa" (Capra, 1992). Questa divisione cartesiana tra spirito e materia ha inciso profondamente nel pensiero occidentale nei secoli successivi a

Cartesio conducendo, tra l'altro, all'annoso problema circa i rapporti tra mente e corpo che tuttora infiamma il dibattito scientifico. Secondo Cartesio, tanto la materia quanto lo spirito erano creazioni di Dio, inteso quale fonte dell'ordine naturale esatto e origine della luce della ragione che consentiva alla mente umana di riconoscere tale ordine; nei secoli successivi, però, tale riferimento a Dio venne tralasciato dagli scienziati che svilupparono le loro teorie seguendo la divisione cartesiana: le scienze umanistiche si concentrarono sulla *res cogitans* e le scienze naturali sulla *res extensa*. L'universo materiale era per Cartesio una macchina priva di qualsiasi intenzionalità o spiritualità; la natura funzionava secondo leggi meccaniche ed ogni cosa, nel mondo materiale, poteva essere spiegata in funzione della disposizione e del movimento delle sue parti. Questa concezione meccanicistica della materia fu estesa da Cartesio anche agli organismi viventi, nel tentativo di formulare una scienza naturale completa: piante ed animali erano considerati semplicemente come macchine, mentre gli esseri umani erano "abitati" da un'anima razionale (*res cogitans*) collegata con il corpo (*res extensa*) attraverso la ghiandola pineale, al centro del cervello. Il corpo umano, dal canto suo, era indistinguibile da un animale-macchina. Questa visione profondamente meccanicista della natura fu ispirata a Cartesio anche dall'alta precisione e tecnologia cui era giunta, al suo tempo, l'arte della costruzione degli orologi: Cartesio comparò gli animali a un "orologio composto da ruote e molle" ed estese questa comparazione al corpo umano, al punto da assimilare un corpo malato ad un orologio mal costruito e, viceversa, un corpo sano ad un orologio ben costruito e perfettamente funzionante.

La rivoluzione scientifica fu coronata dall'opera di Isacco Newton (1642-1728), che scoprì il metodo matematico per descrivere il moto meccanico, giungendo così ad una grande sintesi delle opere di Copernico, Keplero, Bacon, Galileo e Cartesio (Capra, 1992). Keplero aveva derivato le leggi empiriche dei moti planetari studiando le tavole astronomiche, e Galileo aveva scoperto le leggi dei corpi in caduta: Newton combinò questi risultati formulando le leggi generali del moto che governano tutti gli oggetti nel sistema solare, dalle pietre ai pianeti. Resosi conto che ogni oggetto veniva attratto verso la Terra dalla medesima forza che attirava i pianeti verso il Sole, Newton introdusse i concetti di inerzia centripeta e di forza di gravità, pervenendo poi alle famose tre leggi del moto:

1. legge di inerzia (già formulata da Leonardo da Vinci e successivamente da Galileo): afferma che un corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finché non interviene una forza dall'esterno a modificarlo;
2. legge di proporzionalità tra forza e accelerazione: questa legge pone in stretta relazione la forza agente su un corpo con la sua massa e con l'accelerazione a questo impressa, secondo la relazione:  $F = ma$ ;
3. leggi di azione e reazione: afferma che ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria.

L'importanza di tali leggi risiede nella loro universalità: si trovò, infatti, che esse sono valide in tutto il sistema solare e ciò apparve come una conferma del modello meccanicista della natura proposto da Cartesio. Nel 1686 Newton presentò la sua concezione completa della natura e del mondo nei *Philosophiae naturalis principia mathematica (Principi matematici della filosofia naturale)*: quest'opera comprende un vasto sistema di definizioni, proposizioni e dimostrazioni che, per più di duecento anni, vennero considerate la descrizione più esauriente del mondo della natura. Nei *Principia* Newton enuncia anche il metodo sperimentale da lui adottato e che nasce da una fortunata combinazione dei due metodi impiegati fino a quel momento: il metodo empirico-induttivo di Bacone ed il metodo razionale-deduttivo di Cartesio. Infatti, Newton dichiara che non solo gli esperimenti devono fondarsi su un'interpretazione sistematica dei fenomeni, ma che anche la deduzione da principi primi deve essere corroborata da prove sperimentali: in assenza di questi requisiti non è possibile giungere alla formulazione di teorie scientificamente valide. Con questo, Newton consacrò definitivamente il trionfo di quel metodo sperimentale sul quale è fondata, da allora, la scienza della natura.

L'universo newtoniano nel quale avevano luogo i fenomeni fisici era lo *spazio tridimensionale* della geometria classica euclidea, uno spazio vuoto indipendente dai fenomeni che si manifestano in esso. Ogni mutamento nello spazio fisico veniva descritto in relazione ad una dimensione separata, *il tempo assoluto* e privo di qualsiasi connessione con il mondo materiale: esso fluiva ininterrottamente dal passato al futuro, attraverso il presente (Newton, 1686). In questo spazio ed in questo tempo assoluti si muovevano delle particelle materiali, piccoli oggetti solidi e indistruttibili di cui era composta tutta la materia, che Newton supposeva sostanzialmente omogenea: egli spiegava la differenza fra i vari tipi di materia non facendo riferimento ad atomi di peso o densità diversi ma in funzione di aggregazioni più o meno dense di atomi (Capra, 1992).

Nella meccanica newtoniana tutti i fenomeni fisici si riducono al moto di queste particelle elementari causato dalla loro attrazione reciproca, ossia dalla forza di gravità. L'effetto della forza di gravità su una particella o su un qualsiasi oggetto materiale è descritto matematicamente dalle equazioni del moto di Newton, che formano la base della meccanica classica. Per quanto concerne l'indagine empirica di questo universo, essa si arrestava dinnanzi alla natura delle particelle stesse e della forza di gravità: tanto le une quanto l'altra erano creazioni di Dio e come tali sfuggivano ad un'analisi più approfondita.

Nell'*Opticks*, Newton fornì una chiara descrizione di come immaginava la creazione del mondo materiale ad opera di Dio:

“Mi sembra probabile che Dio al principio abbia creato la materia sotto forma di particelle solide, compatte, dure, impenetrabili e mobili, dotate di tali dimensioni e figura, e di tali proprietà e di tali proporzioni rispetto allo spazio, da essere le più adatte per il fine per il quale egli le aveva create; e che queste particelle originarie, essendo solide, siano incomparabilmente più dure di qualsiasi corpo poroso da esse composto; anzi tanto perfettamente dure, da non poter mai consumarsi o infrangersi: nessuna forza comune essendo in grado di dividere ciò che Dio, al momento della creazione, ha fatto uno.” (Newton, 1704).

Da quanto descritto finora emerge chiaramente l'immagine di una gigantesca macchina cosmica interamente governata da meccanismi causali: tutto ciò che accade nasce da una causa ben precisa ed origina effetti determinati e matematicamente prevedibili, ed il futuro di ogni parte del sistema può essere “calcolato” con assoluta certezza purché se ne conosca lo stato in un tempo dato. L'Ottocento ed il Settecento utilizzarono la macchina newtoniana per spiegare fin nei minimi particolari il moto dei pianeti, dei satelliti e delle comete, oltre alle maree e a molti altri fenomeni connessi con la gravità. Infine, tale modello travalicò i confini dell'astronomia, e venne applicato allo studio di processi quali il comportamento di solidi, liquidi e gas, compresi i fenomeni del calore e del suono spiegati in funzione del moto di particelle materiali elementari (Capra, 1992).

La concezione meccanicistica può essere sintetizzata dalla seguente celebre affermazione di P. S. Laplace (1814): *“Dobbiamo dunque considerare lo stato presente dell'Universo come effetto del suo stato anteriore, e come causa del suo stato futuro. Un'intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze di cui è animata la natura e la situazione rispettiva*

*degli esseri che la compongono, se per di più fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi." (Laplace, 1795).*

### **1.3 La termodinamica: il principio dell'entropia e la morte termica**

Nel XIX secolo, l'applicazione della meccanica newtoniana allo studio dei fenomeni termici condusse alla nascita di una nuova branca della fisica: la termodinamica. Questa disciplina, nata dallo sforzo speculativo di studiosi quali Boyle, Boltzman, Clausius e Carnot, si occupa dello studio dell'energia, della quale il calore è una forma. In particolare, vengono analizzati i gas e le loro trasformazioni, che si pongono alla base delle cosiddette macchine termiche, apparati costruiti per convertire calore in movimento, energia in lavoro.

La termodinamica si fonda essenzialmente su tre principi (Capra, 1992):

1. il primo principio, noto come *principio di conservazione dell'energia*, afferma che l'energia non può essere né creata né distrutta, ma solo trasformata;
2. il secondo principio, o principio dell'*entropia*, afferma che in ogni trasformazione di energia (ad esempio trasformando il calore in lavoro), una parte di energia si libera nell'ambiente. L'entropia è la grandezza con cui si misura la quantità di energia che si è liberata nell'ambiente. Quando l'energia liberata nell'ambiente è distribuita in modo uniforme (ad esempio non vi sono più variazioni di calore) si raggiunge uno stato di equilibrio e non è più possibile trasformare l'energia in lavoro. L'entropia misura quanto un sistema sia vicino allo stato di equilibrio e quale sia quindi il grado di disordine del sistema stesso;
3. il terzo principio afferma che *l'entropia, cioè il disordine, di un sistema isolato non può diminuire*. Pertanto, quando un sistema isolato raggiunge una configurazione di massima entropia non può subire ulteriori trasformazioni: ha raggiunto l'equilibrio, o morte termica.

Il principio dell'entropia (o secondo principio della termodinamica) è particolarmente significativo in quanto introduce in fisica l'idea di processi irreversibili. L'irreversibilità si riferisce al fenomeno per cui l'energia si sposta sempre da uno stato di disponibilità ad uno stato di non disponibilità, nel quale essa si è ormai completamente dissipata nell'ambiente e non è più "recuperabile". A questo proposito, l'eminente fisico Sir Arthur Eddington (1882-

1944) afferma che “*l'entropia è la freccia del tempo*”, nel senso che essa obbliga gli eventi fisici a muoversi dal passato verso il futuro, cioè da una situazione di disponibilità di energia ad un'altra in cui l'energia non è più disponibile (Eddington, 1927). La nostra coscienza registra continuamente le variazioni di entropia che avvengono nel mondo attorno a noi: vediamo i nostri amici diventare vecchi e morire; quando ci sediamo vicino a un fuoco vediamo che le braci roventi si trasformano pian piano in ceneri bianche e fredde; ci accorgiamo che il mondo attorno a noi si modifica in continuazione e tutto ciò non è che la manifestazione della seconda legge. È il processo irreversibile della dissipazione di energia del mondo.

Il termine *irreversibilità* si riferisce quindi al fatto che in tutti i fenomeni fisici sarebbe presente una certa tendenza dall'ordine al disordine, senza possibilità di ritornare allo stato originario nel quale l'energia era tutta disponibile: ad esempio, l'energia meccanica si dissipa in calore e non può essere mai recuperata completamente; ancora, se mescoliamo assieme acqua calda e acqua fredda otterremo acqua tiepida, ma non vedremo mai i due liquidi separarsi spontaneamente.

Il terzo principio della termodinamica deriva come conseguenza logica dal secondo principio: dal momento che la dissipazione di energia è un processo irreversibile (nel senso che l'energia dissipata non potrà mai essere recuperata e riutilizzata), l'entropia di un sistema isolato (ossia chiuso rispetto a qualsiasi informazione proveniente dall'esterno) non potrà fare altro che aumentare, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico (o morte termica).

Il termine “entropia” fu introdotto nella metà dell'Ottocento da Rudolf Clausius, impegnato nella ricerca di una forma matematica precisa che descrivesse questa direzione dell'evoluzione dei sistemi fisici; il vocabolo nasce da una combinazione di “energia” e “tropos”, termine greco che significa trasformazione o evoluzione: l'entropia è quindi una quantità che misura il grado di evoluzione di un sistema fisico ma, al contempo, può essere intesa anche come una misura del “disordine”, visto che l'evoluzione di un sistema fisico isolato è accompagnata sempre da un disordine crescente (Capra, 1992).

Come abbiamo visto, il principio dell'entropia afferma che un sistema fisico isolato procede spontaneamente in direzione di un disordine ed una omogeneità crescenti, raggiungendo infine la morte termica. Tuttavia, questa ferrea legge sembra puntualmente contraddetta dal fenomeno della vita: i sistemi viventi, anziché tendere all'omogeneità e al disordine, si

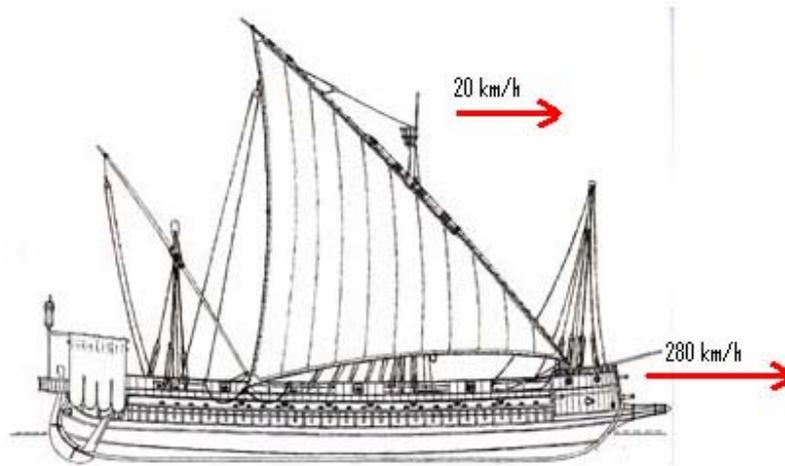
evolvono verso forme di organizzazione sempre più complesse e sono in grado, tra l'altro, di mantenersi lontani dalla morte termica.

Jacques Monod cercò di spiegare la vita come il risultato di condizioni iniziali "improbabili". Con questo espediente logico si rendeva l'apparire della vita compatibile con il principio dell'entropia, ma il suo mantenimento sembrava una lotta continua contro le leggi della fisica, che rendevano altamente improbabile la sua esistenza. L'entropia ammette infatti un solo tipo di evoluzione: la scomparsa di ogni attività macroscopica e di ogni organizzazione. La biologia ha perciò fondato la spiegazione del funzionamento dell'essere vivente sull'impressionante serie di eventi improbabili costituiti dalla comparsa del codice genetico e dalle mutazioni favorevoli, e sull'evoluzione prevedibile verso la morte e l'inattività macroscopica: un universo estraneo alla vita, retto da leggi che la ignorano e in cui noi non siamo altro che incidenti. Jacques Monod usò queste parole per descrivere la visione che nasce dall'entropia: *"l'uomo deve infine distarsi dal suo sogno millenario per scoprire la sua completa solitudine, la sua assoluta stranezza. Egli ora sa che, come uno zingaro, si trova ai margini dell'universo in cui deve vivere. Universo sordo alla sua musica, indifferente alle sue speranze, alle sue sofferenze, ai suoi crimini."* (Monod, 1974).

#### **1.4 La relatività di Galileo**

Nel suo "Dialoghi sui Massimi Sistemi" Galileo Galilei dà una descrizione molto chiara del *principio di relatività galileiana*. Egli immagina un osservatore (inteso come rilevatore oggettivo di eventi), rinchiuso nella stiva di una nave, che esegue una serie d'osservazioni sulla caduta dei gravi. Galileo spiega, molto chiaramente, come in nessun modo sia possibile per questo osservatore trarre alcuna indicazione sulla velocità del moto della nave mediante esperimenti che si svolgano esclusivamente all'interno della nave stessa, in quanto tutti i punti di riferimento si muovono alla stessa velocità dell'osservatore. Galileo nota, però, che per un osservatore fermo sulla spiaggia (anche qui inteso come rilevatore oggettivo di eventi) le velocità dei corpi sulla nave si sommeranno o si sottrarranno alla velocità della nave stessa.

Ad esempio, se un galeone si muove a 20 km/h:



e una palla di un cannone viene sparata alla velocità di 280 km/h da un cannone di prua, l'osservatore fermo sulla spiaggia vedrà la palla muoversi a 300 km/h, cioè 280 km/h della velocità dello sparo sommati ai 20 km/h del movimento della nave. Diversamente, se la palla di cannone viene sparata da poppa, per l'osservatore fermo sulla spiaggia la velocità della palla sarà di 260 km/h, cioè 280 km/h della velocità dello sparo meno i 20 km/h del movimento della nave (dal momento che, in questo secondo caso, la palla di cannone e la nave vanno in direzioni opposte).

Al contrario, per il marinaio che si trova sulla nave e condivide con essa lo stesso sistema inerziale (moto), la palla di cannone si muoverà sempre alla velocità di 280 Km/h qualsiasi sia la direzione in cui la palla viene sparata.

Quindi, un osservatore sulla terraferma che vede la palla di cannone sparata da prua muoversi a 300 km/h mentre la nave si muove a 20 km/h, può concludere che la velocità dello sparo è stata di 280 km/h.

La *relatività di Galileo* nasce dalla constatazione che, cambiando sistema di riferimento, le velocità si sommano o si sottraggono a seconda del moto relativo dei sistemi. In definitiva, nella relatività di Galileo le velocità sono relative al sistema di riferimento, mentre il tempo fluisce in modo costante in tutti i sistemi. E' importante sottolineare che la fisica classica, newtoniana, si basa appunto sul principio di relatività di Galileo.

## 1.5 La relatività di Einstein

Alla fine dell'Ottocento Maxwell si trovò però avanti ad una serie di dati sperimentali che entravano in contraddizione con la relatività di Galileo. Gli esperimenti sull'elettromagnetismo mostravano infatti che la velocità della luce non si somma al moto del corpo che la emette. Inoltre, all'inizio del Novecento Michelson e Moreley dimostrarono in modo certo che la velocità della luce è una costante, cioè non si somma in nessun modo alla velocità del corpo che la emette (Einstein, 1916). Infine, le indagini teoriche profondamente innovatrici di H.A. Lorentz sui fenomeni elettrodinamici e ottici nei corpi in movimento, dimostrarono in modo inequivocabile che la velocità della luce nel vuoto è costante (Einstein, 1916).

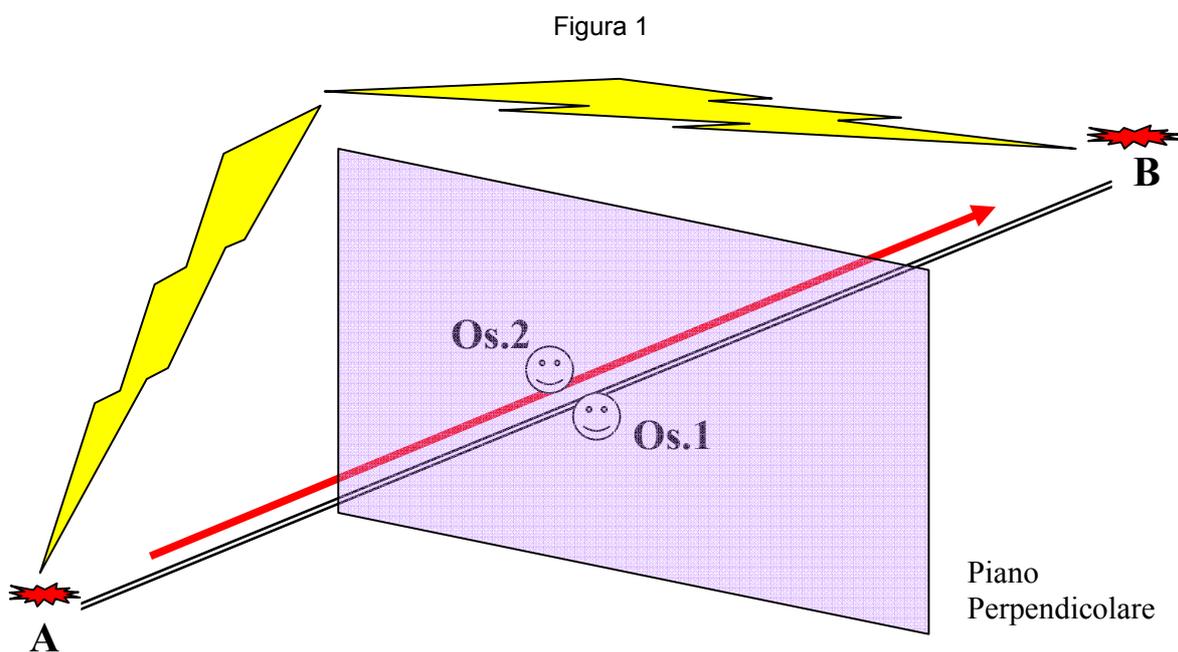
Nel 1905, analizzando i risultati sperimentali ottenuti da Michelson, Moreley e Lorentz, Einstein si trovò costretto a ribaltare la legge della relatività galileiana secondo la quale il tempo è assoluto e la velocità è relativa: infatti, per poter descrivere matematicamente il fatto che la velocità della luce è sempre costante era necessario accettare la relatività del tempo. Per spiegare questa affermazione immaginiamo, dopo 500 anni, un marinaio su una nave spaziale velocissima che si muove a 20 mila chilometri al secondo (km/s) e che spara con il suo cannone laser un raggio di luce, che viaggia a 300mila km/s, nella direzione in cui si muove la nave. Un osservatore (inteso, anche qui, come rilevatore oggettivo di eventi) sulla Terra non vedrà questo fascio di luce muoversi a 320mila km/s come vorrebbe la relatività galileiana, ma lo vedrà viaggiare sempre a 300mila km/s (dal momento che la velocità della luce è una costante universale). L'osservatore sulla Terra, in base alla relatività di Galilei, dovrebbe concludere che il marinaio "spaziale" vede la luce muoversi a 280mila km/s (cioè, i 300mila km/s della velocità della luce da lui osservata meno i 20mila km/s della nave spaziale, dal momento che il marinaio spaziale stesso si muove alla velocità di 20mila Km/s). In contrasto con queste previsioni, tuttavia, anche il marinaio sulla nave spaziale vedrà questo fascio di luce muoversi a 300mila km/s.

Einstein arrivò così alla dimostrazione che l'elemento che varia non è la velocità della luce (che è costante), bensì il *tempo*. Riprendendo l'esempio della nave spaziale, nel momento in cui ci muoviamo nella direzione del fascio di luce, il nostro tempo rallenta in proporzione e per noi la luce continua perciò a muoversi sempre a 300 mila km/s. Questo fatto comporta che, se la nostra velocità fosse prossima della velocità della luce, il nostro tempo rallenterebbe fino

a fermarsi e che, se fossimo in grado di superare la velocità della luce, il nostro tempo si invertirebbe e comincerebbe a fluire all'indietro.

In altre parole, gli eventi che accadono nella direzione verso cui ci muoviamo diventano più veloci, perché il nostro tempo rallenta, mentre gli eventi dai quali ci allontaniamo diventano più lenti perché il nostro tempo accelera.

Per chiarire questa situazione, Einstein riporta l'esempio di un fulmine che colpisce una lunga ferrovia simultaneamente in due punti A e B, molto lontani tra loro (Einstein, 1916).



Un primo osservatore (inteso, anche in questo ambito, come un rilevatore oggettivo di eventi) fermo su una panchina a metà strada tra i due punti colpiti, vedrà i due colpi di fulmine cadere simultaneamente sulle rotaie. Immaginiamo a questo punto un secondo osservatore su un treno velocissimo che si muova da A verso B (Figura 1): nell'istante in cui il lampo colpisce le rotaie, questo osservatore si trova a passare esattamente accanto all'osservatore seduto sulla panchina; ebbene, per l'osservatore sul treno, l'evento del lampo che colpisce il punto B è un evento già accaduto, mentre per l'osservatore seduto sulla panchina sta accadendo in quel momento; al contrario, il lampo che colpisce il punto A è, per il secondo osservatore, un evento che deve ancora accadere, mentre per l'osservatore seduto sulla panchina sta

accadendo in quel momento: da ciò deriva necessariamente che i due osservatori, pur trovandosi nello stesso punto dello spazio al momento dell'evento, non possano raggiungere un accordo sulla contemporaneità dell'evento stesso, in quanto il concetto di contemporaneità degli eventi sarà necessariamente legato alla condizione di moto dell'osservatore.

In altre parole, gli eventi che accadono nella direzione verso cui ci muoviamo diventano più veloci, perché il nostro tempo rallenta; ma gli eventi che accadono nella direzione opposta a quella del nostro moto sono più lenti, poiché in quella direzione il nostro tempo si accelera. Insomma, il tempo scorre in modo diverso a seconda che l'evento avvenga nella direzione in cui ci muoviamo o nella direzione dalla quale ci allontaniamo: nel primo caso gli eventi sono più rapidi, nel secondo caso sono più lenti.

L'esempio appena riportato tiene conto di solo due osservatori dello stesso evento: ma cosa accade nel momento in cui ci sono più osservatori che si muovono ognuno in una direzione diversa e a velocità elevata? La prima coppia di osservatori (uno fermo sulla panchina e l'altro sul treno velocissimo) raggiungerà un accordo sulla contemporaneità per tutti quegli eventi che accadono sul piano perpendicolare al movimento del treno; inserendo un terzo osservatore che si muove in un'altra direzione ma che nell'istante dell'evento passa accanto agli altri due osservatori, si potrà raggiungere un accordo di contemporaneità solo per quegli eventi che accadono sulla retta che unisce i due piani perpendicolari al moto; inserendo un quarto osservatore, l'accordo si potrà raggiungere solo per un punto; inserendo, infine, un quinto osservatore che, per di più, in quel istante non passa accanto agli altri osservatori, non si potrà raggiungere alcun accordo di contemporaneità: di conseguenza, se per noi è reale solo ciò che accade in quel momento, si giungerà al venir meno dell'accordo circa l'esistenza della realtà stessa (Fantappiè, 1993). A questo punto, per poter ristabilire il principio di realtà (ossia l'accordo reciproco tra gli osservatori relativamente a ciò che è reale), che è alla base di qualsiasi indagine scientifica (Olivetti Belardinelli, 1991), siamo costretti ad accettare come reali e copresenti eventi per noi futuri o passati ma contemporanei per altri osservatori. Da ciò deriva che una necessaria conseguenza della teoria della relatività ristretta, è la coesistenza di passato, presente e futuro (Fantappiè, 1993).

Einstein stesso ebbe difficoltà ad accettare questa conseguenza della teoria della relatività, ossia la coesistenza di passato, presente e futuro (Capra, 1992). Il modello della relatività ristretta venne successivamente perfezionato da Minkowski, il quale usò il termine di

“cronotopo” per descrivere l'unione dello spazio con il tempo (G. ed S. Arcidiacono, 1991). Da quando Einstein ha presentato la teoria della relatività il tempo è diventato una dimensione dello spazio: lo spazio non ha più 3 dimensioni, ma quattro.

Un'altra importante conseguenza del nuovo sistema relativistico è stata la presa di coscienza che la massa non è altro che una forma di energia, al punto che persino un oggetto in quiete ha dell'energia immagazzinata nella sua massa. La relazione tra la massa e l'energia è data dalla famosa equazione  $E=mc^2$ , dove  $c$  è la velocità della luce ed  $m$  la massa; questa equazione, che fu scoperta da Oliver Heaviside nel 1890 e perfezionata da Poincaré nel 1900, diventò famosa grazie ad Einstein nel 1905. L'equivalenza tra massa ed energia ha aperto la strada allo studio della fisica quantistica, nella quale la massa non è più associata ad una sostanza materiale, ma è vista come un *fascio di energia*. In particolare, le particelle della nuova fisica vengono ovviamente considerate in termini "relativistici", ossia in funzione di un sistema di riferimento in cui spazio e tempo sono fusi insieme in un continuo quadridimensionale. Da ciò discende che le particelle atomiche vanno intese dinamicamente, come forme nello spazio e nel tempo: il loro aspetto spaziale le fa apparire come oggetti aventi una certa massa, mentre il loro aspetto temporale le presenta come processi implicanti l'energia equivalente. L'esito finale di questi concetti è che, dalla relatività in poi, l'essere della materia e la sua attività sono due aspetti non più separabili: essi non sono altro che aspetti diversi della stessa realtà spazio-temporale.