

CARLO COSMELLI

PRINCIPI DI FISICA

(PER FILOSOFI)

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

LA FISICA , LINGUAGGIO, TERMINI E DEFINIZIONI

06/03/2018 15:08:41

Caratteri 50644

Caratteri 41.8//51.2 / pagine 1-12

1. Il linguaggio che verrà usato

- 1.1. Grandezze Fisiche
- 1.2. Teoremi, Principi, Leggi fisiche, Leggi fenomenologiche
- 1.3. Ipotesi di base
 - 1.3.1. Sistemi di riferimento

- Scheda filosofica #1 Fisica, meccanica, filosofia sperimentale

2. Nota matematica 1

- 2.1. Il significato di variazione di una grandezza
- 2.2. Il significato di variazione di una grandezza in funzione di un'altra
- 2.3. La velocità media
- 2.4. Il significato di "derivata" di una grandezza
- 2.5. Il significato geometrico della derivata
- 2.6. Come si calcola la velocità in un istante (punto) t^* ?
- 2.7. L'accelerazione

INTRODUZIONE

LA FISICA, LINGUAGGIO, TERMINI E DEFINIZIONI

1. Di cosa parleremo, come e perché

Per poter parlare di un certo argomento deve essere chiaro l'oggetto di cui parleremo, gli strumenti che utilizzeremo...e perché vogliamo parlarne.

Vediamo quindi uno schema di massima di tutti i pezzi del gioco. Qui non daremo delle definizioni rigorose né complete, quelle verranno dopo, per ora limitiamoci al significato dato dal buon senso o da quello che ci ricordiamo dall'esperienza. Molte di queste definizioni verranno modificate più volte nel corso dei secoli, nei prossimi capitoli vedremo di raccontare di come e perché debbano essere cambiate.

Il gioco delle parti.

1.1 L'ambiente (la scena)

- Lo Spazio: è quello che ci immaginiamo, una specie di contenitore in cui avvengono tutte le cose che succedono.
- Il Tempo: è quello che "vediamo scorrere", ciò che ci dà un'idea del prima e del dopo e che ha una direzione ben precisa, dal passato verso il futuro.

1.2 Gli attori (chi è di scena) e con che cosa comunicano (i linguaggi)

- La Materia: tutti gli oggetti che possiamo o potremmo (idealmente) "toccare", dai più piccoli – gli atomi ed i loro componenti, elettroni, protoni e neutroni¹ – ai più grandi – i pianeti, le stelle...le galassie.
- Le Forze fondamentali (meglio: le interazioni fondamentali): gli oggetti di base utilizzati dalla materia per scambiarsi informazioni, per accorgersi le une delle altre, insomma per far succedere qualcosa. Una Forza o un'interazione può essere definita come la causa che provoca un cambiamento nell'oggetto con cui interagisce. Le interazioni note sono solo quattro: l'interazione gravitazionale, quella che si esercita fra le masse, descritta dalla legge di gravitazione universale di Newton, sempre attrattiva. L'interazione elettromagnetica, che si esercita fra particelle con carica elettrica, descritta dalla legge di Coulomb e dalla forza di Lorentz², può essere attrattiva o repulsiva. L'interazione Forte che si esercita, fra l'altro, fra protoni e neutroni, e che giustifica perché il nucleo sia stabile (se non ci fosse i protoni, che hanno una carica uguale, si respingerebbero). L'Interazione debole, è l'interazione responsabile del decadimento radioattivo. Queste ultime due interazioni (quella forte e quella

¹ Protoni e neutroni non sono particelle elementari, sono composti di particelle più piccole – i quarks – ma in questo testo trascureremo questo aspetto. In più esistono centinaia di altre particelle materiali, la maggior parte con una vita media brevissima. Gli elettroni invece, come il protone e il neutrone quando si trovano dentro il nucleo di un atomo, sono stabili. In questo libro non affronteremo il problema delle particelle instabili, quindi vedremo solo la materia composta da questi tre oggetti.

² Coulomb: $\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{R^2} \hat{R}$; Lorentz: $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$. Vedremo meglio nel capitolo sull'elettromagnetismo.

debole) hanno un raggio d'azione molto piccolo, diventano praticamente nulle per distanze maggiori dei nuclei atomici, quindi in pratica non contribuiscono alla descrizione del mondo "macroscopico". In questa sede non ne parleremo. Per descrivere l'universo che ci circonda³ saranno sufficienti l'interazione gravitazionale e quella elettromagnetica.

- Interazioni e materia si "parlano" come avverrebbe in un gruppo di persone che conoscono linguaggi differenti e che parlassero contemporaneamente. Alcune persone possono parlare, e capire la lingua italiana, quella inglese e quella francese. Altre solo quella francese. Altre il francese e l'inglese. Quello che succede è che ognuno parla la lingua che conosce e ogni singolo individuo interagisce (cioè può parlare e capire) con le persone che parlano una delle lingue da lui conosciute. E domina l'interazione più "forte". Vedremo meglio in seguito come si definisce la "forza" delle interazioni fondamentali.

1.3 Le regole del gioco (che cambieranno più volte nel corso della storia)

- I Principi della Fisica: alcuni saranno sempre validi, altri dipenderanno dall'ambiente, cioè dalle condizioni in cui ci si trova l'osservatore, cioè chi sta osservando (misurando) il fenomeno in esame.

1.4 Gli strumenti

- La Matematica, che verrà utilizzata per dare di valori numerici a tutto ciò che vorremo misurare e per descrivere in forma matematica i Principi e tutte le leggi che ne derivano. Avere delle formule permette di fare delle previsioni numeriche e di confrontarle con l'esperienza.

- (Almeno) un sistema di riferimento e un sistema di coordinate spazio-temporali: Dove si trova un oggetto in un certo istante? E dopo un po'? L'autovelox che vi fa la multa per eccesso di velocità è uno strumento che sta in un sistema di riferimento (il bordo della strada solidale con la Terra), che ha un misuratore di posizione (tarato in km) e un misuratore di tempo (tarato in ore)...e può misurare, se passa una macchina, a quanti km/ora stava andando utilizzando due valori della posizione e del tempo corrispondente. Associando ad ogni evento una posizione ed un tempo posso descriverne l'andamento temporale, studiarne la storia passata e quella futura (non sempre ovviamente, e con una certa imprecisione o indeterminazione).

1.5 La parti che verranno messe in scena nell'ordine temporale in cui furono scritte. (.xxxxxx.. Non tutte contemporaneamente, alcune non si amano, sono incompatibili fra loro)

- **La Meccanica Classica**, quella di Galileo, di Newton e tanti altri. Gli oggetti in gioco sono la materia "sensibile" ferma o in moto "ordinato": palline, piani orizzontali o inclinati, pendoli, ruote, corde, molle, proiettili, razzi, pianeti, stelle...L'unica interazione che si sapeva descrivere quantitativamente (ai tempi di Newton) è la forza di attrazione gravitazionale fra tutti i corpi che hanno una massa diversa da zero⁴.

- **La Termodinamica**. Il regno della Temperatura. A prima vista sembra simile alla meccanica, in fondo parla di palline che si muovono e che si scontrano seguendo le leggi della Meccanica, ma studia quello che succede quando ho tanti "oggetti" molto piccoli (atomi o molecole) che hanno un movimento "disordinato", caotico... non calcolabile singolarmente. Allora devo usare la statistica fatta su miliardi di miliardi di miliardi di oggetti. Il risultato è che si scrivono nuovi principi, le leggi di Newton non bastano più a descrivere il comportamento di *tanti* oggetti.

- **L'Elettromagnetismo**. Oltre alla massa i corpi possono avere anche una carica elettrica. E fra

³ Quasi tutto...rimarrà fuori la radioattività ed altri fenomeni rari.

⁴ Ma all'epoca di Newton e fino ai primi del '900 *tutti* i corpi avevano massa.

i corpi che hanno una carica elettrica diversa da zero si esercita una nuova interazione: l'interazione elettromagnetica, il problema sarà che questa interazione dipende non solo dalla posizione relativa delle cariche elettriche, ma anche dalla loro velocità relativa. Ma spiega egregiamente tutti i fenomeni elettrici, (quasi) tutti i fenomeni magnetici... e la luce!

- La **Relatività Speciale**: Studia quello che succede quando ho dei sistemi che si muovono con velocità costante uno rispetto all'altro. E risolve alcune incongruenze dell'elettromagnetismo. Ridefinisce lo spazio e il tempo, rispetto a quelli utilizzati da Galileo in poi. Ridefinisce anche il concetto di Energia. Per velocità piccole rispetto a quella della luce si riduce alla meccanica classica.

- La **Relatività Generale**. Una delle più grandi costruzioni mentali mai fatte da un solo uomo. Ha a che fare con masse (grandi masse) e con lo spazio-tempo. Scoprirà che lo spazio-tempo viene modificato ⁵ dalla presenza di masse. Il buon vecchio spazio euclideo è solo un'approssimazione. Ma è essenziale per prevedere correttamente il moto di alcuni corpi celesti o il funzionamento del GPS.

- La **Meccanica Quantistica**. Tutte le teorie precedenti cadono miseramente se vado a vedere cosa succede nel mondo microscopico (dell'atomo in giù tanto per intenderci). Nel senso che le teorie "classiche" non è che diano risultati un po' sbagliati, rispetto alle misure: non torna proprio nulla. E' una costruzione portata avanti da decine di scienziati a partire dal 1900, formalizzata nel 1927 e che continua ad essere sviluppata ancora oggi, con molti punti oscuri o incomprensibili, ma con una caratteristica: funziona benissimo per spiegare quello che vediamo e per prevedere nuovi effetti con una precisione incredibile.

- **Nota**. Tutte queste parti non sempre possono essere messe in scena (utilizzate) contemporaneamente. Per esempio se ho oggetti *piccoli* e molto veloci avrò la Meccanica Quantistica Relativistica, ma se ho oggetti *piccoli* in un campo gravitazionale non sappiamo cosa fare: o li descriviamo con la Relatività Generale oppure con la Meccanica Quantistica, non abbiamo una teoria che descriva contemporaneamente come si comporta la materia microscopica in presenza di gravità. E questo è un bel problema, che ancora non ha trovato soluzione.

Non abbiamo detto perché vogliamo fare tutta questa fatica per comprendere il mondo che ci circonda. Permettetemi di non dirlo, per ora.

2. Il linguaggio che verrà usato

Quando si dice che la scienza moderna nasce con Galileo Galilei si intendono in particolare due aspetti (fra i tanti) che Galilei specificò nei suoi scritti.

1) *sensate esperienze...necessarie dimostrazioni*⁶, in cui Galileo espone chiaramente come il cammino per arrivare ad una descrizione del nostro mondo debba passare attraverso una serie di prove sperimentali, fatte, ripetute, rigettate o validate ed attraverso sensate esperienze, cioè esperimenti

⁵ Alcune teorie di gravità quantistica, ancora non validate, prevedono che lo spazio-tempo vengano *creati* dalla presenza di massa- energia. Ma non ne parleremo.

⁶ Galileo Galilei, *Lettera a Madama Cristina di Lorena granduchessa di Toscana*, (1615).

"intelligenti". Costruiti quindi in modo da riuscire ad estrarre leggi e/o principi universali da esperimenti pensati e disegnati in modo intelligente, tali cioè da rendere trascurabili, o facilmente identificabili, tutti quegli effetti del mondo reale che tendono a mascherare il comportamento ideale che stiamo cercando.

2) *La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi, io dico l'universo, ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto*⁷.

Qui Galileo stabilisce che il mondo naturale può, anzi DEVE essere descritto in forma matematica, cioè quantitativa, tramite dei numeri che possano essere validati o confutati. Si vedrà in seguito⁸ come nel corso dei secoli, in particolar modo nell'ultimo secolo, sia stato necessario estendere la matematica dei tempi di Galileo per descrivere altre geometrie, altre "matematiche", non esistenti ai suoi tempi, ma che si sono dimostrate necessarie proprio per dare una forma quantitativa ad una serie di fenomeni allora sconosciuti, o non trattabili con la matematica del tempo. [Il saggiaiore, cap. VI, controllare]

Questo secondo punto è importante: i Principi della Fisica, o anche le leggi più semplici, sono scritti con il linguaggio formale della matematica, non è pensabile di poterli capire e di comprenderne il significato più profondo se non si conosce il significato del linguaggio matematico, il significato dei simboli utilizzati, delle formule. E' l'analogo di una lingua: per poterla utilizzare, o anche solo per capire una frase scritta in una certa lingua è necessario conoscere l'alfabeto, il significato delle parole, poi la grammatica, la sintassi... solo allora si potrà "leggere" una frase e capirne il significato.

In questo paragrafo richiameremo brevemente i significati di alcuni termini fisici e matematici di uso universale. E' una descrizione formale e forse noiosa per chi già la conoscesse – che quindi può saltarla – ma sarà utile per mettere un punto fermo sul significato di quello che scriveremo in seguito.

1.1 Grandezze Fisiche

Per grandezza fisica si intende una qualunque grandezza che possa, in linea di principio⁹, essere misurata. Per "misurata" si intende la possibilità di assegnare un valore numerico a tale grandezza. Una grandezza fisica misurata o calcolata, la più semplice possibile, si scrive in genere in questa forma

$$G = n \cdot u$$

Dove "G" rappresenta il simbolo che abbiamo deciso di assegnare alla grandezza, "n" il numero che rappresenta il suo valore e "u" l'unità di misura utilizzata per la grandezza. Facciamo un esempio: supponiamo di volere scrivere (quindi comunicare) che la lunghezza di una matita – che abbiamo deciso di chiamare "L" sia 15 cm, avendola misurata in qualche modo. La scrittura corretta sarà: $L = 15 \text{ cm}$, si noti che il numero assegnato alla grandezza è strettamente legato al valore dell'unità di misura utilizzato. La lunghezza della stessa matita

⁷ Galileo Galilei, *Il Saggiaiore* (1624).

⁸ Vedi il paragrafo sul Caos deterministico o la Relatività Generale

⁹ "in linea di principio" significa che si può immaginare una procedura non ambigua che permetta di inferire il valore da assegnare alla grandezza seguendo una serie di operazioni. Non è necessario riferirsi con precisione alle tecniche da utilizzare, spesso le tecniche saranno ideali, per esempio fatte con una precisione non necessariamente disponibile al momento, l'importante è che la misura sia possibile, appunto, in linea di principio, cioè che non comporti alcuna violazione di leggi note.

avrei potuto scriverla anche come $L = 0,15 \text{ m}$ oppure come $L = 5,90'' = 5,90 \text{ in}^{10}$. Si noti come non esista un valore unico con cui posso descrivere una grandezza, il valore numerico dipende strettamente dall'unità di misura utilizzato, che però dovrà essere sempre coerente con il "tipo" della grandezza misurata¹¹. Una lunghezza per esempio dovrà avere come unità di misura sempre una unità di misura "di lunghezza", non potrò utilizzare kg oppure °C per descrivere una lunghezza. E' quella che si chiama coerenza dimensionale.

Le grandezze fisiche però non sono tutte così semplici come quella appena descritta, possono essere più complicate se un solo numero non è sufficiente a descrivere completamente la grandezza in esame, vediamo una classificazione elementare delle grandezze fisiche:

a) Grandezze scalari

Sono quelle grandezze descritte solo da un numero, hanno la forma $G = n \cdot u$.

Esempi: $m = 12 \text{ g}$; $L = 13 \text{ cm}$; $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 50 \text{ km/ora}$

la grandezza può essere anche "adimensionale", cioè una grandezza senza unità di misura, per esempio nel conteggio di "numero di oggetti": p.e. il numero di persone presenti in una stanza è $N = 32$, oppure quando si ha una misura di una grandezza in rapporto ad un'altra: la densità relativa dell'oro è 19,3, in cui si intende che la densità dell'oro è 19,3 volte quella dell'acqua – posta uguale ad 1 g/cm^3 in condizioni determinate.

b) Grandezze vettoriali

Sono quelle grandezze che necessitano di più di un numero per essere descritte completamente. A questa classe appartengono tutte quelle grandezze per cui dobbiamo dare anche una "direzione" oltre al valore della grandezza stessa. Un esempio è quello della velocità: se dico che un'automobile sta andando a 100 km/ora, essendo partita da Roma, devo anche dire in quale direzione si sta muovendo, altrimenti l'informazione non sarà completa, non potrò dire per esempio dopo due ore se si troverà vicino a Firenze o vicino a Napoli o a Teramo. In questo caso la notazione è leggermente più complicata, prendiamo sempre come esempio il caso della velocità:

$\vec{v} = v \cdot \hat{v}$: abbiamo tre grandezze con significato differente:

\vec{v} : il simbolo della grandezza vettoriale è quello assegnato alla grandezza, con sovrapposto un trattino, questo sta ad indicare che si sta parlando di una grandezza vettoriale.

v : è il valore numerico che assegniamo alla grandezza, il cosiddetto "modulo", è la grandezza scalare che ci dice quanto vale numericamente, in questo caso la velocità.

\hat{v} : è il cosiddetto "versore", una grandezza che ha modulo 1 e che indica la direzione e il verso in cui mi sto muovendo¹².

In seguito vedremo come un vettore in uno spazio tridimensionale può essere descritto in maniera completamente equivalente anche fornendo 3 numeri che rappresentano le

¹⁰ Il doppio apice dopo una misura (") è il simbolo per l'unità di misura anglosassone *pollici* = in = inches = 25,4 mm.

¹¹ Un procedimento simile è utilizzato in linguistica, anche se con un formalismo ed un significato leggermente diverso: se scrivo una parola per indicare un oggetto "O" devo necessariamente indicare la lingua utilizzata: O = cucchiaio (*italiano*) = spoon (*inglese*) = Löffel (*tedesco*) = スプーン (*giapponese*)...

¹² Si noti la differenza fra direzione e verso. La direzione indica la retta a cui appartiene il movimento, per esempio la direzione può essere lungo un meridiano, quindi Nord/Sud . Il verso indica quale dei due versi possibili sto effettivamente percorrendo, quindi da Nord verso Sud oppure da Sud verso Nord.

tre componenti del vettore lungo le tre direzioni dello spazio

$\bar{v} \equiv [v_x, v_y, v_z]$, il simbolo \equiv sta ad indicare che il vettore \bar{v} è "rappresentato" dalle tre grandezze v_x, v_y, v_z , se si volessero fare delle operazioni con questa grandezza si dovranno utilizzare delle regole particolari che utilizzano tutte e tre queste grandezze.

c) Grandezze tensoriali

Sono grandezze in cui non sono sufficienti tre valori, cioè le componenti nelle tre direzioni dello spazio, servono più numeri per caratterizzarle completamente, spesso 9 o 16... Non verranno utilizzate in questo testo.

1.2 Teoremi, Principi, Leggi fisiche, Leggi fenomenologiche

Deve essere chiara la differenza fra un teorema ed una legge fisica. Prendiamo ad esempio il Teorema di Pitagora. Esso dice che, se stiamo in uno spazio euclideo¹³, in un triangolo rettangolo il quadrato dell'ipotenusa a è uguale alla somma dei quadrati dei due cateti (b, c):

$$a^2 = b^2 + c^2 \quad (1)$$

Questo è un teorema, cioè dalle ipotesi di partenza segue necessariamente il teorema, tramite una dimostrazione rigorosamente vera. E' VERO, ma attenzione: è vero se ai numeri a, b e c sostituiamo i valori di un triangolo rettangolo ideale, perfetto. Se disegnassimo su di un foglio un triangolo rettangolo, e poi misurassimo con uno strumento (un qualunque strumento) le lunghezze dei tre lati a, b e c , troveremmo che la formula (1) vale solo approssimativamente, questo perché la misura ottenuta per ogni lato non è una rappresentazione esatta del valore "vero" della lunghezza del lato, che non possiamo conoscere esattamente (e al limite non è detto che esista), ma un'approssimazione legata al fatto che la misura ha un'incertezza legata alla precisione dello strumento, che non può mai essere zero. Quindi per ogni misura di lunghezza L otterrò un valore che scriverò come:

Lunghezza = $L \pm \Delta L$, dove L è il valore che ho ottenuto per la misura della lunghezza, mentre ΔL rappresenta l'incertezza con cui ho effettuato la misura; questo sta ad indicare che l'unica cosa che posso dire è che la lunghezza reale del corpo avrà un valore compreso fra $(L - \Delta L)$ e $(L + \Delta L)$ ¹⁴.

Un Principio (della Fisica o di qualunque altra disciplina) invece non viene "dimostrato" a partire da una ipotesi, è solo un'affermazione la cui negazione è non contraddittoria. Nel senso che dice qualcosa che non necessariamente è vera, e che potrebbe anche essere falsa. Un Principio è una costruzione/elaborazione mentale di chi l'ha espresso, che potrebbe benissimo risultare falsa oppure vera solo in parte – e vedremo quante volte sia successo nel corso della storia.

Vediamo un esempio che tratteremo più a fondo in seguito, il Secondo Principio della Dinamica di Newton (scritto in forma scalare):

$$f = m \cdot a$$

¹³ Uno spazio euclideo è uno spazio in cui valgono i principi di Euclide, cioè uno spazio "piatto". Vedremo nel paragrafo dedicato alla Relatività Generale che lo spazio in cui ci muoviamo solo approssimativamente può dirsi euclideo, in realtà è uno spazio "curvo".

¹⁴ Questa è una trattazione molto semplificata di come si scrive un valore con la sua incertezza, vedremo meglio in seguito come al posto dell'incertezza ΔL è più utile scrivere il valore σ_L , la cosiddetta deviazione standard che si calcola utilizzando la statistica, e che fornisce previsioni probabilistiche precise e dettagliate sul valore "vero" che potrebbe avere al grandezza L , oppure su quello che mi aspetterei se ripetessi la misura in condizioni analoghe.

Questo principio dice che se prendo un corpo puntiforme di massa m , e ne misuro l'accelerazione a (ancora non l'abbiamo definita, ma per ora non importa, si assuma per "accelerazione" il significato che proviene dal buon senso), e poi misuro la forza f che agisce sul corpo, allora il **numero** che ottengo per il prodotto $m \cdot a$ sarà (circa, per la solita ragione dell'imprecisione nella misura) uguale al **numero** che avrò ottenuto per la forza f . Non c'è nulla di necessariamente vero in questo. Nel mondo ellenistico per esempio si pensava che la proporzionalità fosse fra la forza e la velocità, non fra la forza e l'accelerazione. La differenza la fanno le misure: utilizzando la relazione $f=ma$ posso descrivere e fare delle previsioni sul moto dei corpi che invece non posso fare se scrivo $f = m v$. La prima funziona, la seconda no.

In seguito vedremo come oltre ai principi della Fisica utilizzeremo delle espressioni che descrivono le forze (le interazioni) possibili fra i vari corpi – e scopriremo che in realtà sono solo quattro¹⁵. Oppure potrò avere delle leggi fenomenologiche, delle leggi cioè che non sono per nulla generali, descrivono solo il comportamento di alcuni i sistemi in determinate condizioni, senza la necessità di sapere "perché" funzionano. E' il caso p.e. delle leggi di Keplero che descrivevano il moto di due corpi liberi che ruotano uno intorno all'altro. Nel moneto in cui Keplero le scrisse non aveva idea del perché il moto dei corpi avesse quelle espressioni matematiche. Si limitò a descriverlo, e funzionava molto bene.

Le leggi di Keplero quindi descrivevano molto bene il moto dei pianeti intorno al Sole, ma una volta scritta la legge di Gravitazione Universale da Newton si è visto come le leggi di Keplero fossero delle naturali – e necessarie - conseguenze delle leggi della meccanica unite alla legge di gravitazione universale.

1.3 Ipotesi di base

In una trattazione moderna della Fisica, come di qualunque altra teoria, è importante definire bene l'ambito in cui ci si muove e le ipotesi che si prendono come vere nella descrizione dei sistemi in esame. Questa parte era spesso sottintesa nei lavori iniziali di Galileo, Newton e degli altri fisici. La sua **impronta**? tuttavia si è rivelata essenziale man mano che la descrizione dell'Universo progrediva, contemporaneamente al nascere di nuovi aspetti e nuovi problemi.

I punti essenziali da definire sono, sembrano, semplici: dobbiamo definire lo spazio in cui ci muoviamo e il tempo. Queste definizioni, che sembreranno ovvie, saranno proprio quelle che Albert Einstein, con la sua Relatività, scardinerà completamente.

Quindi ora descriveremo le ipotesi fatte sullo Spazio e sul Tempo, come fossero necessarie per scrivere correttamente le leggi di Newton e le leggi fisiche scritte fino alla fine del XIX secolo.

1) Lo spazio è euclideo

Lo spazio è descritto dalla geometria euclidea (lo spazio è "piatto"). Valgono tutti i principi di Euclide e tutti i teoremi derivati da essi. Quindi, per esempio, dato un triangolo nello spazio, la somma degli angoli interni deve dare sempre 180° . Se lo spazio fosse curvo la somma degli angoli interni di un triangolo sarebbe minore, oppure maggiore di 180° (geometrie non-euclidee). Uno spazio euclideo (piatto) è una buona approssimazione per descrivere il mondo che ci circonda. In realtà secondo la Relatività Generale (1915) lo spazio in presenza di materia è sempre curvo, ma gli effetti sulla Terra sono quasi sempre

¹⁵ Gravitazionale, elettromagnetica, forte, debole. Oggi si sono unificate le interazioni elettromagnetica e debole, quindi le forze fondamentali al momento sono solo tre, ma di questo non parleremo.

trascurabili, quindi per ora li tralascieremo.

2) Lo spazio è isotropo e omogeneo.

Lo spazio è identico a sé stesso sia in seguito a traslazioni che a rotazioni. Le proprietà fisiche dei corpi non dipendono dalla posizione (omogeneità) o dalla direzione nello spazio (isotropia); quindi non cambiano se spostato il corpo da un punto ad un altro o se ruoto un corpo cambiando la sua direzione nello spazio. Queste ipotesi valgono ovviamente solo se tutte le altre condizioni restano identiche. Se misuro il mio "peso" sulla Luna troverò un valore diverso da quello misurato sulla Terra, ma questo effetto non è dovuto alla non omogeneità dello spazio, bensì alla presenza di corpi con masse differenti che generano una diversa forza gravitazionale. Lo spazio è identico a sé stesso sia in seguito a traslazioni che a rotazioni. Le proprietà fisiche dei corpi non dipendono quindi dalla posizione o dalla direzione nello spazio, quindi non cambiano se spostato il corpo da un punto ad un altro o se misuro una certa proprietà in varie direzioni.

3) Il tempo è isotropo e omogeneo

Per direzioni nel tempo si intendono quella verso il passato e quella verso il futuro. L'omogeneità consiste nell'invarianza per traslazioni nel tempo. Quindi se non variano le condizioni, le proprietà di una grandezza non dipendono da quando le misuro. Questo è un punto fondamentale: se non ipotizzassi l'omogeneità del tempo non potrei fare previsioni sul moto, essendo le durate dei tempi variabili, e quindi anche gli spostamenti, le velocità, le accelerazioni...

4) Esistono uno spazio assoluto ed un tempo assoluto, indipendenti uno dall'altro¹⁶.

Ecco come ne parla Newton¹⁷:

Fin qui è stato indicato in quale senso da intendere, nel seguito, parole non comunemente note. Non definisco, invece, tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti. Va notato tuttavia, come comunemente non si concepiscano queste quantità che in relazione a cose sensibili. Di qui nascono i vari pregiudizi, per eliminare i quali conviene distinguere le medesime cose in assolute e relative, vere e apparenti, matematiche e volgari.

I. Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamata durata; quello relativo, apparente e volgare, è una misura (accurata oppure approssimativa) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno.

¹⁶ Nota: Spazio e Tempo, che in meccanica classica sono due grandezze indipendenti, in meccanica relativistica non lo sono più e si parla di spazio-tempo. Tuttavia per corpi che si muovono a velocità molto minori della velocità della luce nel vuoto (300'000 km/s), questi effetti sono trascurabili e possiamo considerare lo spazio ed il tempo come grandezze indipendenti.

¹⁷ I. Newton, *Principi matematici della filosofia naturale*, Scolio, UTET, Torino, 1965, pagg. 104-108, 110

II. Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale ed immobile; lo spazio relativo è una dimensione mobile o misura dello spazio assoluto, che i nostri sensi definiscono in relazione alla sua posizione rispetto ai corpi, ed è comunemente preso come lo spazio immobile; così la dimensione di uno spazio sotterraneo o aereo o celeste viene determinata dalla sua posizione rispetto alla terra. Lo spazio assoluto e lo spazio relativo sono identici per grandezza e specie, ma non sempre permangono identici quanto al numero. Infatti se la Terra, per esempio, si muove, lo spazio della nostra aria, che relativamente alla Terra rimane sempre identico, sarà ora una parte dello spazio assoluto attraverso cui l'aria passa, ora un'altra parte di esso; e così muterà assolutamente in perpetuo.

III. Il luogo è la parte dello spazio occupata dal corpo, e in relazione allo spazio può essere assoluto o relativo. [...]

IV. Il moto assoluto è la traslazione del corpo da un luogo assoluto in un luogo assoluto, il relativo da un luogo relativo in un luogo relativo. [...]

Definiamo, infatti, tutti i luoghi dalle distanze e dalle posizioni delle cose rispetto a un qualche corpo, che assumiamo come immobile; ed in seguito con riferimento ai luoghi predetti valutiamo tutti i moti, in quanto consideriamo i corpi come trasferiti da quei medesimi luoghi in altri. Così, invece dei luoghi e dei moti assoluti usiamo i relativi; né ciò riesce scomodo nelle cose umane: ma nella filosofia occorre astrarre dai sensi.

Newton utilizza il termine "assoluto" per indicare spazio e tempo, etimologicamente, come 'sciolti' da ogni legame con oggetti o fenomeni ("per loro natura senza relazione ad alcunché di esterno"), a differenza di spazio e tempo del pensiero comune che sono "relativi", "sensibili", "apparenti", "volgari" e "misurabili".

Lo spazio di Newton è, dunque, assoluto in quanto:

- Esistente indipendentemente dall'esistenza di corpi materiali (esiste in sé, non è un sistema di relazioni fra corpi);
- Dotato di proprietà indipendenti dall'interazione con la materia (non ha cioè caratteristiche dinamiche);
- Definito indipendentemente dalle misure e dalle osservazioni che si possono fare sugli oggetti sensibili (non è cioè relativo, a differenza di quello che viene "comunemente" concepito come spazio e rispetto al quale "conviene distinguere").

Si tratta di uno spazio *sostanziale*, dotato di realtà, un contenitore vuoto, indifferente alla materia in esso contenuta e all'osservatore che in esso analizza i movimenti della materia. Analogamente, il tempo assoluto indica un fluire eterno, sciolto dallo spazio ed esistente indipendentemente dalla sua misura volgare in ore, giorni e anni.

L'immobilità dello spazio è garantita dal fatto che esso è detto essere incernierato attorno ad un centro fermo (il "comune centro di gravità della Terra e del Sole e di tutti i pianeti"). Fra tante ipotesi implicite questa è l'unica ipotesi esplicita presente nei *Principia*.

Lo spazio in cui ci muoviamo, quello in cui "esistiamo" è uno, assoluto, e serve come riferimento per qualunque evento di cui voglia misurare la posizione. Analogamente per il tempo: noi viviamo in un "tempo" che scorre ad una certa velocità immutabile e fissata. Qualunque orologio, costruito in maniera identica, misurerebbe lo stesso intervallo per un certo evento.

1.3.1 Sistemi di Riferimento (definizione)

Un sistema di riferimento (SdR in seguito) è un insieme di coordinate utilizzabili per definire la posizione di un punto nello spazio. Un SdR è composto usualmente da un'origine e da tre assi "graduati". Il fatto che gli assi siano tre è legato al fatto che il mondo classico ha tre dimensioni spaziali.

Un **sistema di riferimento cartesiano** è un sistema di riferimento, riferito ad uno spazio tridimensionale, in cui si definisce un'origine "O", da cui partono tre assi fra loro perpendicolari (in genere chiamati x, y, z).

Questo sistema (ideale) viene considerato infinitamente rigido e indeformabile.

Un sistema di riferimento cartesiano $O(x, y, z)$ – figura 1.1

In questo sistema la posizione del punto P è definita dalle tre coordinate $P(x_0, y_0, z_0)$. I tre valori (x_0, y_0, z_0) sono le lunghezze dei segmenti misurati lungo i tre assi x, y, z . Nella figura è mostrato un secondo sistema di riferimento $O'(x', y', z')$ con l'origine nel punto P. Si noti che le coordinate del punto, cioè i tre numeri che individuano la sua posizione, sono differenti a seconda del sistema in cui vengono misurati. La posizione del punto è una sola, ma la sua rappresentazione dipende dal sistema di riferimento utilizzato. In seguito vedremo come sia possibile passare da un riferimento ad un altro.

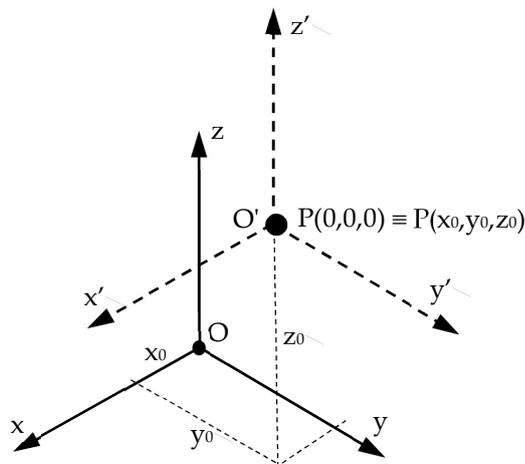


Fig. 1.1 Due sistemi di riferimento $O(x, y, z)$ e $O'(x', y', z')$. Il punto P ha coordinate diverse nei due sistemi di riferimento: $P \equiv (O: x_0, y_0, z_0) \equiv (O': 0, 0, 0)$.

Fra gli infiniti sistemi di riferimento che posso immaginare una classe preferenziale è quella dei sistemi "inerziali". Un **sistema di riferimento inerziale** (anche riferimento inerziale o sistema inerziale o sistema di riferimento Galileiano o spazio inerziale) è un sistema di riferimento che descrive lo spazio come omogeneo, isotropico, e in modo indipendente dal tempo.

Vedremo meglio i dettagli in seguito, per ora si può assumere che esista nell'universo almeno un sistema inerziale, solidale con lo spazio assoluto. Un buon esempio di sistema inerziale può essere (approssimativamente) il sistema costituito dal Sole (come origine) e da tre stelle fisse che individuano

la direzione dei tre assi.

1.3.2 Lo stato di un sistema

Quando vogliamo descrivere un sistema dal punto di vista fisico-matematico diciamo che vogliamo descrivere lo *stato* del sistema, dove con *stato* intendiamo il valore di tutte le variabili necessarie per una descrizione completa del sistema. Nel caso per esempio di una particella di dimensioni trascurabili avremo che lo stato della particella è descritto dalle 6 variabili spaziali (le tre coordinate spaziali x, y, z e le tre coordinate della velocità v_x, v_y, v_z) e dal tempo t . Una volta definite queste grandezze avrò definito lo stato del sistema e potrò utilizzare le leggi della fisica per prevederne il comportamento futuro, nel caso rimanesse isolato o se interagisse con altri sistemi.