

Insegnare la fisica classica in “maniera moderna”

- Forze ed interazioni
- I principi della dinamica
- Simmetria e conservazione
- Centralità delle oscillazioni
- momento angolare
- Keplero rivisitato
- La propagazione delle onde
- Interferenza e diffrazione

Forze e interazioni

Se volessimo dire in una sola frase cos'è la fisica, potremmo dire che

“la fisica si occupa delle interazioni tra gli oggetti materiali”

- **cosa sono le interazioni?**
- **cosa sono gli oggetti materiali?**

forze o interazioni?

le quattro interazioni

- interazione gravitazionale
- interazione elettromagnetica
- interazione debole
- interazione forte

esempi di interazione gravitazionale

la massa è la sorgente dell'interazione gravitazionale

esempi di interazione elettromagnetica

la carica elettrica è la sorgente dell'interazione elettromagnetica

cosa sono le altre due?

perché non ci sono altrettanto familiari?

quanto sono importanti?

come sappiamo tutte queste cose?

il metodo sperimentale e il ruolo delle speculazioni teoriche

e tutte le altre forze?

- la fune che tira una cassa
- il gancio a cui è appesa una massa
- la reazione vincolare del pavimento
- l'attrito
- ...

I libri di testo per i licei sviluppano tutta la meccanica senza fare riferimento a nessuna interazione, a parte quella gravitazionale, che però è chiamata “forza peso”

cosa sono queste altre forze?

Sono tutte manifestazioni della interazione elettromagnetica

l'importanza dell'unificazione

l'elettromagnetismo è citato come il primo esempio di “unificazione”

ma anche la gravitazione “universale” è un bellissimo esempio di unificazione

l'unificazione è una via maestra.

Unificazioni presenti e future

Altre unificazioni sono solo “formali”

forza di Newton e forza di Coulomb

$$f_N \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad f_C \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

gli oggetti materiali

ma cosa sono gli oggetti (e soggetti) delle interazioni?

l'esempio della mela che casca sulla terra...

oggetti materiali: cosa c'è dentro?

I componenti fondamentali della materia

- elettrone
- protone
- neutrone
- neutrino

quattro interazioni per quattro componenti?

i componenti elementari della materia

oggi sappiamo che i componenti fondamentali della materia ordinaria sono in realtà:

- elettrone
- neutrino
- quark up
- quark down

il problema delle tre “repliche”

le antiparticelle

$4 \times 3 \times 2 = 24$ oggetti elementari

troppi o pochi?

allora, forze o interazioni?

non si tratta di una differenza semantica:

le forze di Newton o di Coulomb rappresentano l'interazione a distanza tra due masse o due cariche

se muovo (o addirittura rimuovo) una delle due sorgenti, l'altra risente istantaneamente della variazione

le forze a distanza non sono tuttavia compatibili con la relatività ristretta, secondo la quale nessuna informazione si può propagare con velocità maggiore di quella della luce

nell'800, Faraday aveva già sviluppato l'idea di campo, con la rappresentazione delle linee di forza uscenti dalle sorgenti.

la soluzione delle eq. di Maxwell di un'onda che si propaga dimostra che esiste qualcosa che rappresenta il campo elettromagnetico che continua a viaggiare nello spazio anche quando la carica che lo ha generato venisse eliminata (p. es. un dipolo oscillante emette un'onda che continua a propagarsi anche se le due cariche del dipolo vengono sovrapposte e azzerate)

mediatori delle interazioni

le quattro interazioni sono tutte “mediate” da particelle (il fotone, i bosoni intermedi, i gluoni e il gravitone)

campi di materia e campi di forza

in meccanica quantistica le interazioni sono sempre “locali”, tra un campo di forza e un campo di materia

(parleremo di non-località in MQ, qui con “località” si intende la compresenza di due campi nella stessa regione dello spazio-tempo)

torniamo agli oggetti materiali

oltre la scala nucleare (10^{-15} m) possiamo dimenticare la forza forte e debole

rimaniamo quindi con due leggi molto simili (proporzionalità inversa con il quadrato della distanza)

però tra la scala atomica e la scala macroscopica (in questo contesto, la scala “umana”) c'è il numero di Avogadro, 6×10^{23} : in qualche cm^3 di materia solida ci sono un milione di miliardi di miliardi di molecole

il principio di sovrapposizione

una fondamentale ancora di salvezza è che per entrambe le leggi (di Newton e di Coulomb) vale il principio di sovrapposizione:

dati tre o più oggetti dotati di massa (o di carica elettrica), l'effetto dell'interazione gravitazionale (o elettromagnetica) su uno qualunque degli oggetti è uguale alla somma (vettoriale) delle forze che eserciterebbero separatamente su tale oggetto tutti gli altri oggetti presi in considerazione.

Questo principio vale anche per la sovrapposizione degli effetti separati dell'interazione gravitazionale ed elettromagnetica, e vale quindi per tutte le manifestazioni delle forze che hanno una rilevanza macroscopica

(cos'è un principio in fisica?)

Non è un postulato: da un principio possono discendere come teoremi varie leggi (analogamente ad un postulato)

Gli effetti dei principi però devono essere verificati sperimentalmente.

Tuttavia se si verifica che un principio vale "entro certi limiti", allora anche i teoremi continueranno a valere entro gli stessi limiti

sovrapposizione e linearità delle equazioni

Il principio di sovrapposizione richiede che le equazioni che legano forze ed accelerazioni siano lineari

(attenzione alla nozione di linearità in fisica!)

p. es. il fatto che l'effetto della somma delle forze è uguale a m per la somma delle accelerazioni

$$\vec{f}_i = m\vec{a}_i$$

$$\vec{F} = \sum \vec{f}_i = \sum m\vec{a}_i = m \sum \vec{a}_i$$

non funzionerebbe né se nella forza ci fosse un termine quadratico nell'accelerazione, né se comparisse un termine costante

validità del principio di sovrapposizione

Qualunque funzione si può sviluppare in serie.

Se ci fermiamo al primo ordine (e l'ordine zero è nullo) allora il principio di sovrapposizione può valere in prima approssimazione per qualunque legge.

L'annullamento dell'ordine zero è necessario per preservare la proporzionalità tra causa effetto. Se $f = ma$ stabilisce che le forze sono causa delle accelerazioni, un termine lineare indicherebbe che ci sono accelerazioni anche in assenza di forze!

Per i sistemi dinamici possiamo aspettarci che il principio di sovrapposizione sia rispettato **in prima approssimazione** da qualunque legge che esprima una relazione di causa-effetto.

termine costante e leggi di scala

L'annullamento dell'ordine zero è una caratteristica delle leggi di potenza $y = cx^k$ ($k \neq 1$) (di cui una legge lineare è l'esempio con esponente $k = 1$) (per semplicità poniamo $c = 1$)

Le leggi di potenza sono caratterizzate dall'"invarianza di scala", ossia dall'invarianza della legge per cambiamento di unità di misura: $y(ax) = (ax)^k = a^k x^k = a^k y(x)$

E' evidente che un termine costante costituirebbe una scala assoluta per y che romperebbe l'invarianza di scala: $y = x^k + y_0$

$$y(ax) = (ax)^k + y_0 = a^k x^k + y_0 \neq a^k y(x)$$

la generalità del “punto materiale”

la validità e l'applicabilità del concetto di punto materiale si basa sostanzialmente sul principio di sovrapposizione, spesso combinato col teorema di Gauss (derivante dalla dipendenza della forza dall'inverso del quadrato della distanza),

e sui teoremi del baricentro, $\vec{x}_{c.d.m.} = \frac{\sum m_i \vec{x}_i}{M}$
quantità di moto (I teorema) $\vec{Q} = \sum m_i \vec{v}_i = \frac{d}{dt} \sum m_i \vec{x}_i = \frac{d}{dt} M \vec{x}_{c.d.m.} = M \vec{v}_{c.d.m.}$
e effetto delle forze (II teorema) $\vec{F} = \sum m_i \vec{a}_i = M \vec{a}_{c.d.m.}$

Un corpo esteso (anche se non è rigido!) si comporta come un punto materiale posizionato nel baricentro nel quale sia concentrata la massa totale M del corpo

I principi della dinamica

**Come si insegnano
e (soprattutto) cosa ci insegnano
Perché sono così importanti i tre
principi della dinamica?**

la validità si è dimostrata così generale (attraverso lo sviluppo della meccanica analitica) da indurre molti filosofi e scienziati a cadere nel riduzionismo

**Ma prima di tutto, cosa dicono i
principi della dinamica?**

Il “modello standard” dei tre principi

il primo principio come principio di inerzia

il secondo principio come legge di Newton, $F = ma$

il terzo principio come principio di azione e reazione

cosa c'è di male

- **la circolarità delle forze**
se $F = ma$ non è una semplice definizione delle forze, come posso definire operativamente la forza?
- **insostenibilità microscopica**
- **terzo principio e azioni a distanza**
- **basi sperimentali in ombra**
- **le leggi di conservazione non compaiono in maniera trasparente**
- **in principio si applicano solo ai “punti materiali”**

la circolarità delle forze

- **generalmente la circolarità si risolve con la definizione statica delle forze:**
se le forze possono essere definite staticamente (e misurate, con un dinamometro) allora rimuovendo una delle forze (p. es. un vincolo e in particolare il dinamometro) posso verificare sperimentalmente che $F = ma$
- **E' un procedimento solido?**
(anche senza considerare l'insostenibilità microscopica)

la circolarità delle forze

se staticamente stabilisco la presenza di un campo di forze (per esempio la gravità), posso assumere che il campo sia presente indipendentemente dalle forze che lo bilanciano

funziona?

anche in linea di principio?

chi garantisce che nel caso del corpo in moto non compaiano altre forze? p.es. la resistenza del mezzo

ma anche per un campo elettrico l'effetto concomitante di un campo magnetico!

insostenibilità microscopica

come definisco una forza a livello microscopico?

non posso inserire un dinamometro dentro un atomo per misurare la forza tra un nucleo e un elettrone

come posso conciliare il determinismo newtoniano con la meccanica quantistica?

pensiamo solo al principio di indeterminazione...

come posso formulare il terzo principio se devo rinunciare alle azioni a distanza?

le basi sperimentali

punto materiale isolato

dipendenza delle forze dalla distanza

esistenza di sistemi inerziali

esistono sistemi nei quali un corpo fermo rimane fermo

principio di relatività galileiana

le leggi fisiche sono le stesse in tutti i riferimenti inerziali

il problema della gravità

annullamento delle forze esterne
(vincolo, attrito, cuscino d'aria etc.)

caduta libera

l'ascensore di Einstein
l'assenza di peso degli astronauti