

Galileo e lo studio del moto

0) Introduzione

Galileo può essere considerato il primo scienziato moderno. Egli non si pone il problema del "perché" si muovono i corpi, ma cerca invece di descrivere "come" essi si muovono. Per fare ciò utilizza la matematica e non solo la logica, gli esperimenti e non solo le osservazioni e assume principi fondamentali da cui deduce le leggi.

Galileo inoltre sostiene una nuova concezione astronomica che considera il Sole fermo e la Terra in moto e afferma l'importanza delle verità scientifiche accanto a quelle religiose.

Le novità introdotte da Galileo furono ritenute pericolose dalla Chiesa, che in un drammatico processo lo condannò ad abiurare le proprie idee.

Fin da giovane Galileo cercò di capire **il moto dei corpi**, interessandosi in particolare al moto dei **pendoli**. La capacità dei pendoli di risalire quasi alla stessa altezza dalla quale erano caduti era straordinaria. La velocità acquisita dal peso durante la caduta ne permetteva la risalita. Questa grandezza sembrava più importante della traiettoria percorsa. Ma qual'era la relazione tra altezza e velocità di caduta, tra corpi in quiete ed in moto?

Per risolvere il problema Galileo pensò di far scivolare dei pesi su dei **piani inclinati**: anche qui fece l'ipotesi che l'altezza di caduta e non l'inclinazione del piano determinasse la velocità con cui il peso arriva a terra. Con studi ed esperimenti accurati, inventando un orologio ad acqua per misurare i tempi, Galileo pervenne ad una scoperta fondamentale: **la legge di caduta** dei corpi. **Lab.** Contro la fisica di Aristotele egli affermò qualcosa che ancora oggi non è intuitivo: se nello stesso istante lasciamo cadere due corpi di peso diverso, questi toccheranno terra contemporaneamente.

Via via altri elementi della fisica tradizionale venivano messi in discussione. Per mantenere dei corpi in movimento è sempre necessaria una forza applicata come sosteneva Aristotele? Galileo propose una nuova interpretazione e presentò una prima formulazione del **principio d'inerzia**: le forze non mantengono i corpi in moto ma modificano lo stato di quiete o di moto dei corpi; i corpi possono essere in moto (rettilineo uniforme) anche senza che ci siano forze in azione. Oramai lo "stato naturale" dei corpi non è più la quiete ma il moto: si introduce così una visione della natura tipica del mondo moderno.

Un ulteriore risultato fu forse stimolato da un'applicazione militare: qual'è la **traiettoria dei proiettili** sparati da un cannone? Componendo il moto orizzontale (legge d'inerzia) con quello verticale (legge di caduta), Galileo ottenne una parabola e risolse il problema.

Infine nei libri della maturità, i *Dialoghi* ed i *Discorsi*, i risultati precedenti vengono utilizzati per un nuovo e ancor più straordinario sviluppo. Le osservazioni e gli esperimenti eseguiti all'interno di una cabina di una imbarcazione in moto rettilineo uniforme danno gli stessi risultati di quelli eseguiti sulla terra. Se la cabina non ha oblò come faccio a sapere se sono in mare o a terra? Nasce così il **principio di relatività**, un contributo fondamentale anche alla fisica contemporanea.

1) Il moto del pendolo e l'impossibilità del motore perpetuo; altezza di caduta e non traiettorie

Galileo cominciò a studiare il movimento dei pendoli osservando che un pendolo al termine di ogni oscillazione tende a ritornare nella posizione iniziale, cioè che il peso tende a risalire alla stessa altezza da cui è caduto.

Se facciamo oscillare un pendolo, originariamente nella posizione P, esso risalirà dall'altra parte quasi alla stessa altezza dalla quale è caduto.

Sim.1: Pendolo

Se poniamo dei vincoli (dei chiodi nei punti F, G,H) la traiettoria del pendolo, dopo la verticale di simmetria, sarà ovviamente differente: il pendolo però tenderà a risalire sempre alla stessa altezza, indipendentemente dalla traiettoria di risalita.

Fig.1

Se mettiamo il vincolo in H, il pendolo non potrà risalire alla stessa altezza di caduta per effetto del vincolo, però si può notare che il peso si riavvolge intorno al vincolo, un'indicazione che la velocità acquisita nella caduta non è stata completamente esaurita nella risalita.

Tutte le osservazioni per assumere un significato devono essere inquadrare in principi o modelli concettuali: Galileo si fece guidare da un principio di impossibilità del motore perpetuo. Immaginò che in assenza di attriti e di altre cause di disturbo i pendoli sarebbero risaliti esattamente alla stessa altezza; per un'altezza superiore (o inferiore) sarebbe violata l'impossibilità del perpetuum mobile: il corpo con operazioni successive, in virtù del solo proprio peso potrebbe essere sollevato indefinitamente.

Sim.1: Pendolo senza resistenza dell'aria

Un corpo infatti non può risalire ad un'altezza maggiore di quella dalla quale viene lasciato cadere per effetto solo del proprio peso, altrimenti avremmo un motore perpetuo, cioè un dispositivo che potrebbe continuare a fornire lavoro (il sollevamento del pendolo) indefinitamente.

Queste considerazioni portarono Galileo a ritenere che l'elemento fondamentale del processo fosse l'altezza di caduta e non la traiettoria effettuata e quindi alla possibilità di studiare il moto di caduta dei gravi, troppo rapido per poter essere analizzato direttamente, attraverso esperienze compiute su palline che, sempre per effetto del loro peso, rotolano lungo piani inclinati.

Fig.2

2) Piani inclinati: la caduta

Una prima esperienza fatta da Galileo fu quella con un piano inclinato e una serie di campanelli. In questo modo non erano necessari orologi per misurare il tempo. Galileo non poteva disporre di orologi meccanici, che furono in seguito costruiti proprio sulla base delle leggi della meccanica formulate dallo stesso Galileo.

Sim.: piano inclinato con campanelli

Nei *Discorsi* descrive una seconda esperienza effettuata utilizzando come strumento di misura un orologio ad acqua.

Sim.: piano inclinato con orologio ad acqua

Attraverso una serie di considerazioni ed esperienze Galileo ricava che le leggi di caduta libera sono quelle di un moto uniformemente accelerato, cioè che gli spazi percorsi sono proporzionali al quadrato dei tempi trascorsi ($S \propto t^2$), che le velocità sono proporzionali ai tempi ($V \propto t$), che la velocità finale dipende dalla radice quadrata dell'altezza h di caduta ($V \propto \sqrt{h}$) e infine che la velocità che un corpo acquisisce alla fine della caduta non dipende dalla massa (peso) del corpo. Quindi a differenza di quanto sostenuto da Aristotele tutti i corpi in caduta libera cadono con la stessa accelerazione.

Galileo fece cadere dall'alto della torre di Pisa due sfere di dimensioni simili ma di peso diverso ed osservò quando toccavano terra. Sebbene la sfera più pesante toccasse terra qualche istante prima di quella più leggera, Galileo ipotizzò che tutti i corpi cadono con la stessa velocità: la differenza che si osserva nella realtà è dovuta alla diversa resistenza dell'aria.

Questo risultato era in netto contrasto con la teoria di Aristotele, secondo cui la velocità di caduta di un corpo è tanto più grande quanto più pesante è il corpo.

Ma sentiamo direttamente quello che dice Galileo:

"Vi assicuro che una palla d'artiglieria, che pesi cento, dugento e anco più libbre, non anticiperà di un palmo solamente l'arrivo in terra della palla di moschetto..."

E a chi obiettava che la palla più piccola arrivava a terra qualche istante dopo:

" Voi fate come molt'altri fanno che, divertendo il discorso dal principale intento, vi attaccate a un mio detto che manca dal vero quant'è un capello e che sotto questo capello volete nascondere un difetto d'un altro grande quant'una gomena di nave"

Queste conclusioni di Galileo poterono più tardi essere sperimentalmente confermate da Newton con degli esperimenti sui pendoli, ed anche con degli esperimenti fatti utilizzando un lungo tubo di vetro da cui era stata aspirata via l'aria: all'interno del tubo una pallina di piombo ed una piuma cadono con la stessa velocità.

3) Il principio di inerzia

Estrapolando il discorso riguardante il moto su piani inclinati Galileo arrivò anche ad una prima formulazione della legge di inerzia. Infatti se la pallina deve risalire sempre alla stessa altezza, collegando il piano inclinato lungo cui la pallina cade con una serie di piani inclinati su cui la pallina può risalire, e diminuendo sempre più l'inclinazione del piano di risalita fino ad arrivare ad un piano orizzontale, la pallina, in assenza di attrito, continua a procedere sul piano orizzontale con la velocità che aveva ottenuto per effetto della caduta. Quindi prosegue indefinitamente con un moto rettilineo con velocità costante.

Sim: piano inclinato con trampolino

Il principio di inerzia, come vedremo più dettagliatamente parlando di Newton, afferma che se un corpo è in moto esso continua a muoversi di moto rettilineo uniforme se non intervengono cause esterne.

4) Il moto dei proiettili e la composizione dei moti

L'aver definito le leggi del moto orizzontale (principio di inerzia) e di quello verticale (legge di caduta) permise a Galileo di determinare con notevole esattezza il moto dei proiettili, applicazione militare non da poco in quell'epoca.

Sim.: Moto proiettili

Galileo considera la traiettoria che compiono i proiettili come la composizione di due moti. La componente orizzontale è una componente che consente una velocità costante, permette cioè di percorrere spazi uguali in tempi uguali. A questa si somma la componente verticale data dalla legge di caduta, in cui invece

gli spazi percorsi sono proporzionali ai tempi al quadrato, per cui gli intervalli spaziali aumentano sempre più in corrispondenza di uguali intervalli temporali. Il risultato è una parabola. Ora è da notare, che indipendentemente dalla velocità orizzontale il tempo impiegato a raggiungere la posizione finale C dipende semplicemente dalla legge di caduta cioè, in pratica, il tempo di caduta tra la posizione A e la posizione B è uguale al tempo di caduta tra la posizione A e la C.

Sim.: Composizione moti

Quello che cambia è solo la sovrapposizione di una componente orizzontale della velocità, che quindi modifica la traiettoria complessiva ma non modifica la legge di caduta verticale. Questo è un altro risultato in profondo contrasto con la concezione aristotelica.

5) Il principio di relatività

Tutto ciò porta a dei risultati straordinari per quello che riguarda un nuovo principio, formulato da Galileo e ripreso più recentemente da Einstein: il principio di relatività.

Osserviamo la figura: se l'individuo che corre con moto rettilineo uniforme lascia cadere la sfera, quale sarà la traiettoria di caduta?

Fig : uomo che corre

La risposta a questo problema è fondamentale perché è proprio questa sovrapposizione tra moti orizzontali e verticali che permette di capire il principio di relatività di Galileo e la sua contrapposizione agli aristotelici. L'aspetto interessante di questo problema è che mentre per noi (osservatori esterni) la traiettoria è la A se l'individuo è in moto e la B se è fermo, per il corridore in ogni caso la palla cade verticalmente lungo la stessa traiettoria. Quindi dal punto di vista del corridore non ha importanza se egli sia in moto o fermo perché la palla cade sempre ai suoi piedi nello stesso istante.

Si può collegare questo problema alla controversia tra Galileo e gli aristotelici della sua epoca? Il dibattito può essere schematizzato così: quale sarà la traiettoria di una sfera che cade dalla torre di Pisa ?

Vi era un consenso unanime sul fatto che la sfera sarebbe caduta ai piedi della torre con una traiettoria verticale. L'interpretazione di questo fatto era invece controversa. Per gli aristotelici ciò costituiva un'indicazione del fatto che la Terra è ferma: se la Terra fosse in movimento, argomentavano, la sfera cadrebbe

secondo la traiettoria C; infatti mentre la sfera cade la Terra sotto di lei si muove. Galileo invece assume che la Terra é in movimento ma anche che vale il principio di inerzia: per lui la sfera per inerzia continua a muoversi orizzontalmente insieme con la torre e la Terra, e si muove rispetto alla Terra solo del moto di caduta verticale. Rispetto ad un osservatore sulla Terra la sfera cade mantenendosi sempre vicino alla torre: la traiettoria sar  dunque la B, mentre rispetto ad un osservatore esterno alla Terra sar  la A. In entrambi i casi la sfera cade ai piedi della torre. Con questo Galileo non vuole provare che la Terra é in movimento (ci  sar  fatto con delle osservazioni astronomiche) ma che dall'esperienza sulla caduta dei gravi noi abitanti della Terra non possiamo dire se la Terra sia in movimento oppure no, perch  l'esperienza é la stessa in entrambi i casi:

"...pertanto io sin qui resto soddisfatto e capacissimo della nullit  e del valore di tutte le esperienze prodotte in provar pi  la parte negativa che l'affermativa della conversion della Terra"

Questo é il contenuto del principio di relativit  di Galileo: esso afferma in definitiva che ci possono essere corpi in movimento senza forze applicate (vedi il principio di inerzia), pertanto se siamo su un sistema in moto rettilineo uniforme e facciamo degli esperimenti di fisica non ci accorgeremo di essere in movimento perch  non possiamo sperimentare alcuna forza diversa da quelle di un sistema in quiete. Le leggi della fisica sono le stesse nei due riferimenti. Galileo esprime in forma molto affascinante questi concetti in riferimento ad esperienze fatte in una cabina di una nave in moto uniforme.