

Fisica Generale

Lezione 9

Facoltà di Ingegneria

Livio Lanceri



Introduzione

- *Premessa: una nuova grandezza fisica, la "forza"*
 - Concetto intuitivo di forza (deformazione e variazioni nel movimento dei corpi)
 - punti di vista aristotelico e galileiano sulle cause del movimento
- *Dinamica della particella*
 - I tre Principi della Meccanica Newtoniana
 - Principio di Invarianza Galileiana e "riferimenti inerziali" (quelli in cui le leggi della dinamica appaiono più "semplici")
 - Due nuove grandezze fisiche: "massa inerziale" e "forza"
 - definizioni operative, unita' di misura
 - Forze "reali" in natura (riconducibili alle interazioni con altri corpi)
 - fondamentali (gravitazionale, elettromagnetica, debole, forte)
 - "fenomenologiche" (reazioni vincolari elastiche, attriti, ...)
 - Forze "inerziali" (appaiono solo nei sistemi di riferimento "non inerziali")



Gli Assiomi o Leggi del Moto

- *I Principio: "inerzia" (*)*

$$\vec{F}_{tot} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{v} = \text{cost.} \quad \Rightarrow \quad \vec{p} = m\vec{v} = \text{cost}$$

- *II Principio: "forza" e accelerazione (*)*

$$\vec{F}_{tot} = m\vec{a} \quad \text{o meglio :} \quad \vec{F}_{tot} = d\vec{p}/dt \quad \text{con} \quad \vec{p} = m\vec{v}$$

- *III Principio: "azione" e "reazione"*

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$$

- *(*) valgono solo nei sistemi di riferimento "inerziali" !*

- Nuove grandezze fisiche: **massa**, **forza**, **quantita' di moto**

- *Principio di Relativita' Galileiana*



*Primo Principio,
riferimenti inerziali,
Relatività Galileiana*



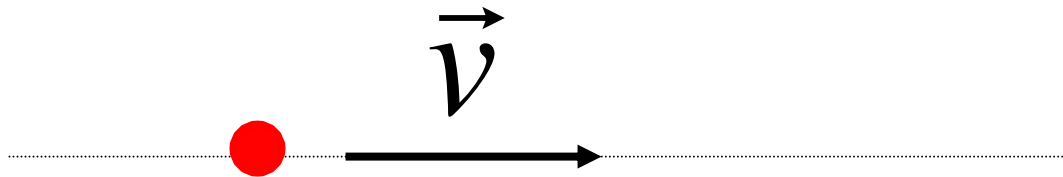
Lex I - I Principio

- *Lex I*

- *Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare*

- *I Principio*

- *In un sistema di riferimento inerziale (*) ogni corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finche' non agisce su di esso una qualche causa ("forza") esterna*

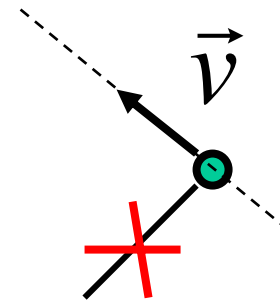
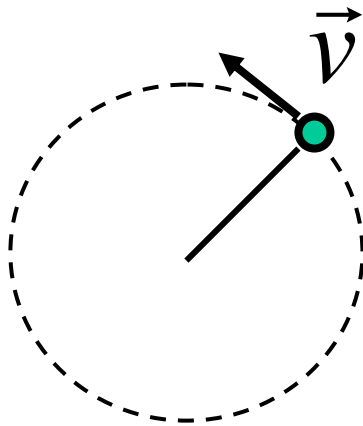


I Principio - commenti - 1

- *Gia` formulato da Galileo*



- Base empirica: estrapolazione...(esperimenti con piani inclinati)
- Assenza di "cause" ("forze") esterne: approssimabile con vari accorgimenti
- Attenzione: il moto circolare uniforme richiede una forza applicata!



Sopprimendo la forza il moto diventa rettilineo uniforme



Base dei principi: sperimentazione!



I Principio - commenti - 2

- *Valido solo nei sistemi di riferimento "inerziali"*

a partire dai dati sperimentali:

- sono **inerziali** tutti i sistemi di riferimento che si muovono di **moto rettilineo uniforme** rispetto ad un sistema di riferimento con:
 - **origine** nel centro di massa del sistema solare (*) (anche il centro della terra: circa OK)
 - **orientazione degli assi costante** rispetto alle **"stelle lontane"**

un sistema di riferimento solidale con la terra (**rotante con essa**) e' solo approssimativamente inerziale !

(*) **non esattamente inerziale**: rispetto alla "radiazione di fondo":

$$v_S = 370 \pm 10 \text{ km/s}, \quad a_S \approx 10^{-10} \text{ m/s}^2$$



Relativita' Galileiana

- *Le leggi della meccanica sono le stesse per gli osservatori in moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro*

NB: le *leggi del moto* ($F_{tot} = ma$), non la *legge oraria* ($r = r(t)$) del moto!

(legge oraria uguale solo a parita` di condizioni iniziali ($r_0 = r(t_0)$, $v_0 = v(t_0)$)
(Esempi)

Nello studio dei *moti relativi*, per *diversi* osservatori in moto relativo rettilineo uniforme:

- le *velocita`* di una particella risultano *diverse*
- ma le *accelerazioni* osservate sono *uguali*, essendo nulla l'"accelerazione di trascinamento" da un sistema all'altro
- (da cui: la legge fondamentale del moto $F_{tot} = ma$ e` la stessa...)



Secondo Principio,

Forze,

Massa inerziale





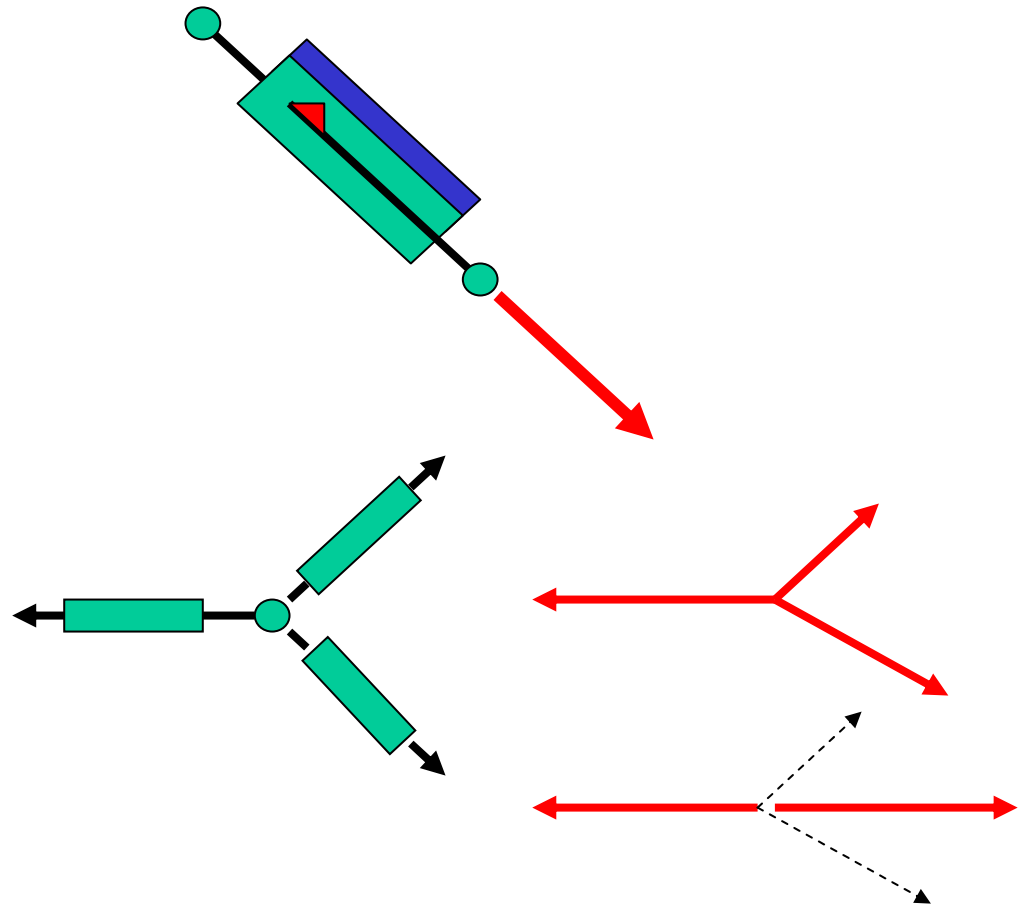
Forze - 1

- *Come definiamo operativamente la forza, che compare poi esplicitamente nel II Principio?*
 - La legge $F_{\text{tot}} = ma$ potrebbe essere considerata come "definizione dinamica della forza": ogni volta che osserviamo l'accelerazione di un corpo diciamo che essa e' conseguenza dell'applicazione di forze, la cui somma (*risultante*) e' F_{tot} ; esiste pero' il problema di definire al tempo stesso la massa m del corpo (con la stessa equazione??)
 - E' possibile una definizione "statica" della forza, indipendente dal II Principio (misura tramite *dinamometri*)



Definizione statica della Forza

- *I corpi elastici hanno deformazioni reversibili e riproducibili*
 - Possono essere usati per definire operativamente la "forza" che provoca la deformazione
- *Il dinamometro è uno strumento tarato per la misura della forza*
 - intensità, direzione, verso
- *Analisi dell'equilibrio tra due o più forze*
 - la somma di due forze si ottiene con la regola del parallelogramma
 -  **forze = vettori!**
 - Equilibrio: somma nulla
- *problemi pratici*  *def. "dinamica"*



Lex II - II Principio

- *Lex II*

- *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.*

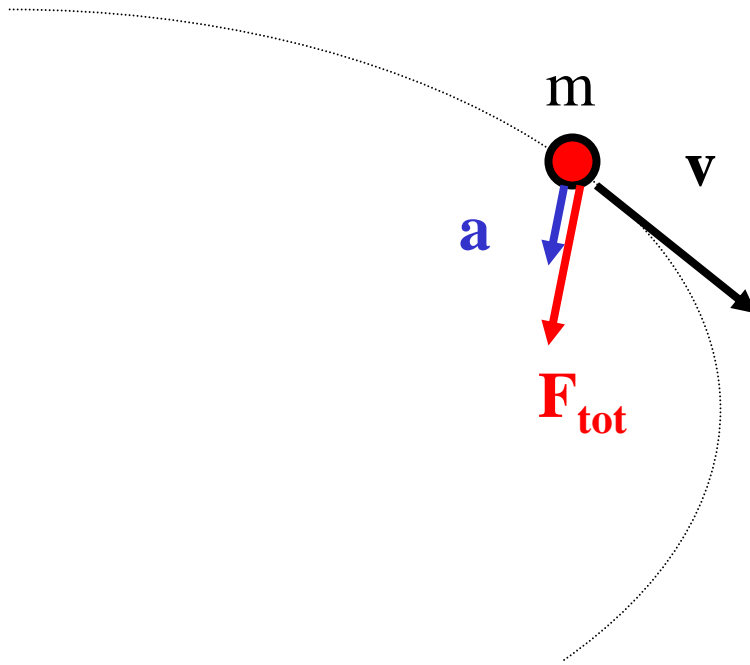
- *II Principio*

- *In un sistema di riferimento inerziale (*) l'accelerazione di una particella e' direttamente proporzionale alla forza risultante agente su di essa e inversamente proporzionale alla massa inerziale della particella.*
- *In altri termini: la derivata della quantita' di moto della particella e' direttamente proporzionale alla forza risultante agente su di essa.*



II Principio - commenti

- In simboli:*
 - \vec{a} : accelerazione osservata nel sistema inerziale
 - \vec{F}_{tot} : risultante delle forze applicate alla particella
 - m : massa inerziale della particella



$$\vec{a} \equiv d\vec{v}/dt = \vec{F}_{tot}/m$$

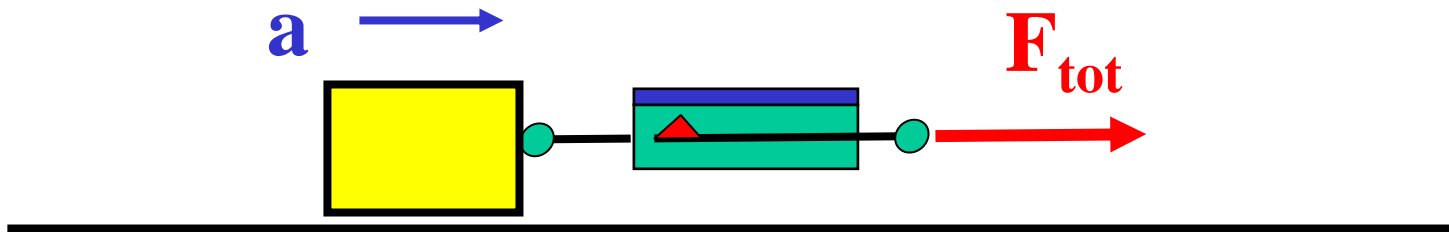
$\vec{p} \equiv m\vec{v}$ e' la quantita' di moto

$$d\vec{p}/dt = m d\vec{v}/dt = \vec{F}_{tot}$$

$$d\vec{p} = \vec{F}_{tot} dt$$

Massa inerziale: definizione operativa

- *Massa inerziale: e' il coefficiente costante di proporzionalita' tra forza risultante F_{tot} applicata e l'accelerazione a misurata, caratteristico di ciascun corpo*



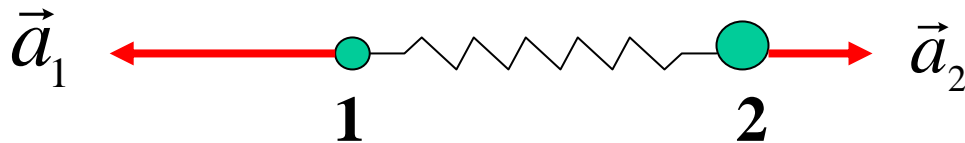
- *Applico e misuro (dinamometro) forze di diverse intensita', e misuro le corrispondenti accelerazioni; verifico che, per ogni dato corpo:*

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_2} = \frac{F_3}{a_3} = \dots = m \qquad F_i = |\vec{F}_i|, \quad a_i = |\vec{a}_i|$$



Massa inerziale - 2

- *Un'altra possibile definizione operativa:*
 - sistema di due corpi interagenti *esclusivamente tra loro*



- si osserva:

$$\vec{a}_1 \neq 0 \Rightarrow \vec{a}_2 \neq 0$$

stessa direzione, versi opposti

per una data coppia di corpi: $a_2/a_1 = C_{12} = \text{cost}$

cioe': $\vec{a}_2 = -C_{12}\vec{a}_1$

- si possono confrontare i corpi con un corpo campione fissato per mezzo di una "bilancia inerziale"



Massa inerziale - 2

- "bilancia inerziale"

- la misura delle accelerazioni o delle velocità per la generica coppia di corpi (i, 1) fornisce il coefficiente corrispondente



$$\vec{a}_2 = -C_{12}\vec{a}_1 \Rightarrow \vec{v}_2 = -C_{12}\vec{v}_1 \text{ ad ogni istante}$$

quindi anche

$$\vec{v}_2(t) - \vec{v}_2(t_0) = \int_{t_0}^t \vec{a}_2 dt = -C_{12} \int_{t_0}^t \vec{a}_1 dt = -C_{12}[\vec{v}_1(t) - \vec{v}_1(t_0)]$$

- Fissato un corpo campione cui viene assegnata la massa unitaria, per ogni altro corpo la massa si può misurare come:

$$\frac{m_1}{m_i} = \frac{a_i}{a_1} = C_{12} \quad \text{cioe':} \quad m_i = \frac{1}{C_{1i}} m_1 = \frac{a_1}{a_i} m_1$$



Massa inerziale - 3

- *La massa così introdotta è una grandezza fisica additiva*
 - (si verifica sperimentalmente)
- *Nel S.I.:*
 - Il chilogrammo (1 kg) è la massa di un cilindro di platino iridio conservato nel Laboratorio di Pesi e Misure a Sevres
 - approssimativamente: massa di 1 decimetro cubo di acqua distillata, alla temperatura di quattro gradi Celsius



Forza - 2

- *La misura statica delle forze (dinamometri) e' poco precisa e riproducibile; nel Sistema Internazionale:*
 - La legge $F_{\text{tot}} = ma$ viene considerata come "definizione dinamica della forza": ogni volta che osserviamo l'accelerazione di un corpo di massa data, diciamo che essa e' conseguenza dell'applicazione di forze, la cui somma (*risultante*) e' F_{tot}
 - Il **newton** (1N) e' l'intensita' della forza che agendo su un corpo di massa 1kg gli imprime un'accelerazione di modulo 1m/s.s



Forze - 2

- *Cos'è la forza risultante?*

- Dallo studio sperimentale dell'effetto di varie forze *separatamente e combinate assieme* si deduce che la forza risultante agente su un corpo è la *somma vettoriale* delle singole forze (**Principio di sovrapposizione delle forze o dell'indipendenza delle azioni simultanee**)
- *Attenzione!* In ogni data condizione, per una particella l'accelerazione è determinata dalla risultante di *tutte* le forze applicate ad essa in quella condizione



Predittività del II Principio ?

A prima vista, se è usato per definire la forza risultante applicata, il II Principio non fornisce nessun'altra informazione che già non sia presente nell'accelerazione osservata istante per istante, e in particolare non permette di predire il moto della particella

- Ma: se ci sono buoni motivi per ritenere di conoscere *a priori* le forze applicate alla particella, da queste e dalle condizioni iniziali del moto si può predire la legge oraria del moto $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$
- Come in molti altri campi della Fisica, la legge generale è espressa da *un'equazione differenziale* (in questo caso $\mathbf{F}_{tot} = m\mathbf{a} = m d\mathbf{v}/dt$) che bisogna *integrare* per ottenere il comportamento del sistema (*soluzione generale*) nelle condizioni particolari considerate (*condizioni iniziali* \Rightarrow *soluzione particolare*)



Forze - 3

- *4 tipi di forze (reali) "fondamentali"*
 - interazioni **gravitazionale, elettromagnetica, debole, forte**
 - per saperne di più:
 - http://pdg.lbl.gov/cpep/adventure_home.html
 - e in particolare:
 - http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_components.html

- *Forze (reali) "fenomenologiche", riconducibili a quelle "fondamentali"*
 - interazioni tra atomi e molecole
 - forze di reazione elastica
 - attriti, etc.



Forze - 5

- Forze "inerziali" (anche: "apparenti" o "fittizie")
 - I principi della dinamica (con forze "reali") *non valgono* nei sistemi di riferimento *non inerziali*
 - In particolare, in tali sistemi $F_{tot} = ma$ con F_{tot} risultante delle forze "reali" *non e' valida*
 - Per poter usare l'equazione $F_{tot} = ma$ in tali sistemi bisogna introdurre ulteriori forze (*inerziali o apparenti o fittizie*) esprimibili in funzione delle accelerazioni di trascinamento e di Coriolis, che descrivono il moto accelerato dell'osservatore (riferimento) non inerziale
 - Questo argomento verra' affrontato nel seguito... per il momento *restringiamo l'analisi ai riferimenti inerziali*



Terzo Principio

e

*Conservazione della
quantità di moto totale*



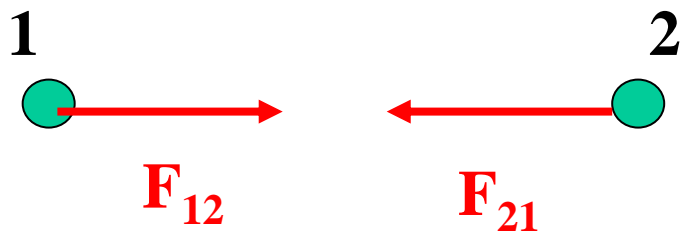
Lex III - III Principio

- **Lex III**

- *Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.*

- **III Principio**

- Se una particella (corpo) esercita una forza su un'altra particella (corpo), quest'ultima esercita una forza opposta sulla prima.



$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

applicate in punti diversi !!!

III Principio e quantità di moto

- *Formulazione equivalente: Principio di Conservazione della Quantità di Moto Totale*

- La quantità di moto totale di un sistema di due particelle, soggette **soltanto** alla loro mutua interazione (*isolate*), rimane costante nel tempo

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2 \quad \text{da cui: } m_1 \vec{a}_1 dt = -m_2 \vec{a}_2 dt$$

$$m_1 d\vec{v}_1 = -m_2 d\vec{v}_2 \quad \text{e integrando:}$$

$$m_1 [\vec{v}_1(t) - \vec{v}_1(t_0)] = -m_2 [\vec{v}_2(t) - \vec{v}_2(t_0)]$$

$$m_1 \vec{v}_1(t) + m_2 \vec{v}_2(t) = m_1 \vec{v}_1(t_0) + m_2 \vec{v}_2(t_0) = \text{cost}$$



Conclusioni



Conclusioni

- *Abbiamo discusso i tre Principi della Dinamica Newtoniana, la Relativita` Galileiana, le forze, la massa inerziale*
- *Prossimi passi:*
 - Note le forze applicate e le condizioni iniziali: prevedere il movimento
 - esempi (f. gravitazionale, attriti, reazioni vincolari)
 - Lavoro ed energia:
 - scorciatoie per prevedere alcuni aspetti del moto
 - "moneta di scambio"
 - Impulso, quantita` di moto, momento angolare
 - Teoremi utili per alcune applicazioni

