Scuole superiori

Fisica

OSB

Latest version 7 ottobre 2023

Indice

Storia

0.1 Personaggi

- Galileo
    -
    -
- Newton
    -
    -
- Snell
- Huygens
    -
    -
- Hooke
- Lagrange: meccanica analitica
- Laplace: meccanica analitica
- Bernoulli
- Cauchy
- Navier
- Stokes
- Young
- Fresnel
- Thompson
- Fourier
- Carnot
- Joule
- Kelvin
- Volta
- Faraday
- Maxwell
- Heaviside
- Boltzmann
- Marie Sklodowska e Pierre Curie
- Thomson
- Rutherford
- Einstein
- Planck
- Bohr
- Heisenberg
- Schrodinger
- Dirac
- Born
- ...

1. Breve storia della fisica

1.1 La fisica prima di Galileo

1.1.1 ...

1.1.2 Le leggi del moto dei piantei: Copernico e Keplero

1.2 XVI e XVII secolo: la meccanica e l'ottica

- studio della dinamica dei corpi: reso difficile sulla Terra dalla presenza dell'aria e dalla resistenza dei corpi in moto
  - Galileo ricava il suo principio di inerzia paragonando la condizione di quiete con la condizione nella stiva di una nave in moto non accelerato (nella stiva non si percepisce la resistenza dell'aria)
  - ci si dedica allo studio dei corpi celesti, che Newton suppone si muovano nel vuoto
- per svolgere lo studio dei corpi celesti servono strumenti ottici, come il cannocchiale
  - nel procedimento di perfezionamento del cannocchiale, gli scienziati si trovano a studiare diversi fenomeni ottici
  - i risultati degli studi che permettono di perfezionare il cannocchiale trovano applicazione anche nel miglioramento dei microscopi

1.2.1 Il metodo scientifico: Galileo

- Il metodo scientifico
- Osservazioni astronomiche
- Il principio di inerzia

1.2.2 La meccanica classica e la legge di gravitazione universale: Newton

Isaac Newton (1642-1727) era studente al Trinity College di Cambridge, quando nel 1665 l'istituto venne chiuso per il diffondersi della peste, costringendo Newton a proseguire in autonomia i propri studi. Il 1666 viene considerato il suo *annus mirabilis* nel quale approfondì i suoi studi, sviluppando il calcolo infinitesimale – sviluppato in maniera indipendente dal tedesco Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716) –, formulando i tre principi della dinamica classica e la legge di gravitazione universale.

Al ritorno in università a Cambridge nel 1667, Newton venne nominato membro del Trinity College e professore di matematica nel 1669.

Nel 1679, dopo essersi dedicato agli studi sull'ottica, Newton ritornò agli studi sulla gravità per la determinazione delle orbite dei pianeti e la derivazione rigorosa delle leggi di Keplero. Proprio quest'ultima derivazione forniva la risposta al dubbio che si sarebbero posti nel 1684 tre membri della Royal Society: il matematico e architetto Christopher Wren (1632-1723) – celebre per il suo ruolo nella ricostruzione di Londra dopo il grande incendio del 1666 –, il fisico Robert Hooke (1635-1703) – curatore degli esperimenti presso la Royal Society, da considerarsi il primo sperimentatore professionista retribuito della storia, celebre per i suoi esperimenti di ottica, il perfezionamento di microscopi e telescopi e la formulazione della legge elastica –, ed Edmond Halley (1656-1742) – professore a Oxford, famoso astronomo, matematico e scienziato della Terra, al quale fu intitolata la cometa della quale prevedette correttamente il ritorno dopo le osservazioni del 1532, del 1607 di Keplero, e del 1682.

Nel 1687 vennero dati alla stampa i *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, testo nel quale Newton pubblicava molti dei suoi risultati tenuti fino ad allora inediti, tra i quali i principi della dinamica e la legge di gravitazione universale, usati per svolgere alcuni problemi sul moto dei corpi celesti, spiegare le maree come effetto dell'attrazione gravitazionale della Luna e presentare una prima stima della velocità del suono nell'aria: quest'ultima stima era sbagliata, a causa dell'ipotesi sbagliata da parte di Newton sulla propagazione del suono a temperatura costante.

1.2.3 L'ottica

- Newton: prisma e lenti; cannocchiale a riflessione
- Huygens
- Snell e Fresnel?

1.3 XVIII e XIX secolo: la termodinamica e l'elettromagnetismo

1.3.1 La meccanica analitica

- Leonhard Euler ()
- Lagrange ()
- Laplace ()

1.3.2 La meccanica dei mezzi continui: solidi e fluidi

Solidi:

- Hooke: legge costitutiva di solidi elastici
- Euler ()–Bernoulli (): modello di trave elastica
- Navier (): equazioni di governo del comportamento elastico delle strutture

Fluidi:

- Torricelli e Pascal: studi sulla statica dei fluidi
- Newton: studi sulla viscosità
- Bernoulli, D'Alembert, Lagrange, Laplace, Poisson: studio dei fluidi non viscosi
- Hagen, Poiseuille: studio di alcune correnti di fluidi viscosi: correnti in tubi
- Navier, Stokes: equazioni di governo dei fluidi
- Prandtl, von Karman: studio dello strato limite
- Reynolds, Kolmogorov: studio della turbolenza

1.3.3 La termodinamica

- Hooke () e Boyle () compiono studi sui gas, con l'impiego di pompe ad aria
- Black () e Watt () sviluppano i concetti di capacità termica e calore latente all'Università di Glasgow

- Sadi Carnot (1796-1832), abbandonata la carriera militare nell'esercito francese, si dedicò agli studi sull'efficienza delle macchine termiche, i cui risultati vengono pubblicati nelle *Riflessioni sulla potenza motrice del fuoco*
- I primi due principi della termodinamica vengono formulati nei lavori del 1850 di William Rankine (1820-1872) tra le università di Glasgow ed Edinburgo, Rudolf Clausius (1822-1888) tra Berlino e Zurigo, e William Thompson (Lord Kelvin, 1824-1907) a Glasgow.
- Clausius introduce il concetto di entropia nel 1865.
- Josiah Willam Gibbs (1839-1903), professore di matematica fisica a Yale, pubblica tre articoli sull'equilibrio e l'evoluzione spontanea dei processi termodinamici, incluse le reazioni chimiche

1.3.4 La meccanica statistica

- Gli studi di Daniel Bernoulli () pubblicati nel 1738 nel volume *Hydrodynamica* fondano le basi della teoria cinetica dei gas: viene data una descrizione molecolare dei gas; la pressione viene messa in relazione con il numero di urti delle molecole, la temperatura con l'energia cinetica media.
- Studi embrionali di termodinamica statistica vengono presentati da Rudolf Clausius e James Clerk Maxwell, che propone la distribuzione delle velocità molecolari
- Ludwig Boltzmann () sviluppa la meccanica statistica, riuscendo a spiegare come le leggi della termodinamica classica (descrizione macroscopica del fenomeno) siano un'evidenza del comportamento microscopico di un sistema costituito da un gran numero di particelle: fornisce una definizione statistica dell'entropia, legandola al numero di microstati di un sistema, che può essere interpretata come una misura del disordine del sistema stesso. Nel 1902 J. Willard Gibbs formalizza la meccanica statistica come approccio generale a ogni sistema – macroscopici o microscopici, gassosi o non gassosi.

1.3.5 L'elettromagnetismo

1.4 XX secolo: la fisica moderna

1.4.1 La relatività di Einstein

La relatività speciale o ristretta.

La relatività generale: una nuova teoria della gravitazione.

1.4.2 La meccanica quantistica

II Il metodo scientifico

2. Il metodo scientifico

3. La misura

III Meccanica

4. Cinematica

Definizione 4.1 — Cinematica. La cinemcatica è quel ramo della meccanica che si occupa di descrivere il moto dei corpi, indipendentemente dalle cause del moto.

Il moto dei corpi viene descritto usando i concetti di **tempo** e **spazio**.

4.1 Cinematica del punto materiale

Definizione 4.2 — Posizione. Una volta definito un sistema di riferimento, si può definire la posizione di un punto P con il raggio vettore $\mathbf{r}_P$ che unisce l'origine del sistema di riferimento con la posizione del punto P.

Definizione 4.3 — Velocità. La velocità di un punto P rispetto a un sistema di riferimento viene definita come la derivata nel tempo del raggio vettore $\mathbf{r}_P$,

$$\mathbf{v}_P = \frac{d}{dt}\mathbf{r}_P =: \dot{\mathbf{r}}_P \ . \tag{4.1}$$

Definizione 4.4 — Accelerazione. L'accelerazione di un punto P rispetto a un sistema di riferimento viene definita come la derivata nel tempo della velocità $\mathbf{v}_P$ del punto, equivalente alla derivata seconda della posizione

$$\mathbf{a}_P = \dot{\mathbf{v}}_P = \ddot{\mathbf{r}}_P \ . \tag{4.2}$$

4.2 Cinematica di un insieme di punti materiali

4.3 Cinematica del corpo rigido

4.4 Vincoli

5. Massa, proprietà inerziali e dinamiche

5.1 Proprietà inerziali

Definizione 5.1 — Massa. La massa viene definita come la quantità di materia.

Per la definizione operativa della massa in dinamica si rimanda al capitolo (8).

5.1.1 Centro di massa

$$\mathbf{r}_G = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n} m_i \mathbf{r}_i \ . \tag{5.1}$$

5.1.2 Momento statico

5.1.3 Momento di inerzia

5.2 Quantità dinamiche

In questa sezione vengono definite alcune quantità dinamiche che risulteranno utili nello studio della dinamica dei corpi nel capitolo 8. In particolare, vengono definiti:

- la quantità di moto
- il momento della quantità di moto
- l'energia cinetica

per i sistemi meccanici modellabili come punto materiale, insieme di punti materiali, e corpi rigidi. Queste quantità sono **grandezze additive**.

5.2.1 Punto materiale

5.2.1.1 Quantità di moto

$$\mathbf{Q} = m\mathbf{v} \tag{5.2}$$

5.2.1.2 Momento della quantità di moto

$$\mathbf{\Gamma}_0 = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times \mathbf{Q} \tag{5.3}$$

5.2.1.3 Energia cinetica

$$K = \frac{1}{2} m |\mathbf{v}|^2 \tag{5.4}$$

5.2.2 Sistema di punti materiali

5.2.2.1 Quantità di moto

$$\mathbf{Q} = \sum_i \mathbf{Q}_i = \sum_i m_i \mathbf{v}_i \tag{5.5}$$

5.2.2.2 Momento della quantità di moto

$$\mathbf{\Gamma}_O = \sum_i \mathbf{\Gamma}_{O,i} = \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \times \mathbf{Q}_i \tag{5.6}$$

5.2.2.3 Energia cinetica

$$K = \sum_i K_i = \sum_i \frac{1}{2} m_i |\mathbf{v}_i|^2 \tag{5.7}$$

5.2.2.4 Corpi rigidi

5.2.2.5 Momento della quantità di moto

5.2.2.6 Energia cinetica

5.2.3 Sistema di punti materiali

6. Azioni

Definizione 6.1 — Forza. Una forza è un'entità fisica vettoriale che è in grado di cambiare lo stato del moto di un sistema.

6.1 Momento di una forza

Definizione 6.2 — Momento di una forza. Il momento di una forza rispetto a un **polo** O, $\mathbf{M}_O$, viene definito coem il prodotto vettoriale tra il raggio $\Delta\mathbf{r}_{OP} = \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_O$ tra il polo e il punto di applicazione e la forza $\mathbf{F}$,

$$\mathbf{M}_O = \Delta\mathbf{r}_{OP} \times \mathbf{F} \ . \tag{6.1}$$

6.2 Lavoro di una forza

Definizione 6.3 — Lavoro elementare di una forza. Il lavoro elementare δL di una forza $\mathbf{F}$ è il prodotto scalare tra la forza e lo spostamento elementare $d\mathbf{r}$,

$$\delta L = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \ . \tag{6.2}$$

Il lavoro di una forza è la somma dei lavori elementari. Se si suddivide la storia degli spostamenti in una somma di spostamenti incrementali,

$$\Delta\mathbf{r} = \sum_{i=1}^{n} \Delta\mathbf{r}_i \ , \tag{6.3}$$

e si considera la forza applicata costante (in intensità e direzione) a tratti su ogni spostamento incrementale $\Delta\mathbf{r}_i$, il lavoro della forza viene definito come la somma dei lavori incrementali, $\Delta L_i = \mathbf{F}_i \cdot \Delta\mathbf{r}_i$

$$L = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{F}_i \cdot \Delta\mathbf{r}_i \ . \tag{6.4}$$

Definizione 6.4 — Lavoro di una forza. Se si fa tendere a zero la lunghezza degli spostamenti incrementali, il lavoro di una forza viene definito come l'integrale (di linea) di

Riemann

$$L = \int_{\gamma(\mathbf{r})} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \ , \tag{6.5}$$

avendo indicato con $\gamma(\mathbf{r})$ la curva nello spazio percorsa dal corpo, sulla quale avvengono gli spostamenti elementari.

6.3 Impulso di una forza

Definizione 6.5 — Impulso elementare di una forza. L'impulso elementare $d\mathbf{I}$ di una forza $\mathbf{F}$ viene definito come il prodotto della forza e l'intervallo elementare di tempo dt per il quale agisce la forza,

$$\delta \mathbf{I} = \mathbf{F} dt \ . \tag{6.6}$$

Definizione 6.6 — Impulso di una forza. Viene definito come la somma di tutti gli impulsi elementari tra due istanti desiderati, $t \in [t_0, t_1]$, e al limite si riduce all'integrale di Riemann

$$\mathbf{I} = \int_{t=t_0}^{t_1} \delta \mathbf{I} = \int_{t=t_0}^{t_1} \mathbf{F} dt \ . \tag{6.7}$$

6.4 Esempi di forza

6.4.1 Reazioni vincolari

Fare riferimento alla sezione 4.4

6.4.2 Forza peso in prossimità della superficie terrestre

6.4.3 Forza elastica

6.4.4 Forza di attrito

6.4.4.1 Attrito statico

6.4.4.2 Attrito dinamico

7. Statica

7.1 Condizioni di equilibrio

Definizione 7.1 — Condizioni di equilibrio per un punto materiale.

$$\sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i = \mathbf{0} \tag{7.1}$$

Definizione 7.2 — Condizioni di equilibrio per un corpo rigido.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i &= \mathbf{0} \\ \sum_{i=1}^{n} \mathbf{M}_{O,i} &= \mathbf{0} \end{aligned} \tag{7.2}$$

7.2 Esempi

8. Dinamica

8.1 Principi della dinamica di Newton

1. principio di inerzia
2. secondo principio della dinamica
3. principio di azione e reazione

8.1.1 Primo principio della dinamica

Un corpo imperturbato, sul quale agisce un sistema di forza dalla risultante nulla, rimane nello stato di quiete o in moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema di **riferimento inerziale**.
Cosa intendiamo per sistema di riferimento inerziale?

8.1.2 Secondo principio della dinamica

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{I}^{ext} \ , \tag{8.1}$$

o in forma differenziale

$$\frac{d}{dt}\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{ext} \tag{8.2}$$

8.1.3 Terzo principio della dinamica

8.2 Equazioni cardinali della dinamica

8.2.1 Moto di un punto materiale

Prima equazione cardinale – quantità di moto

$$\frac{d}{dt}\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{ext} \tag{8.3}$$

Seconda equazione cardinale – momento della quantità di moto

$$\mathbf{M}_O = \mathbf{r} \times \mathbf{Q} \tag{8.4}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\boldsymbol{\Gamma}_O = & \frac{d}{dt}\left((\mathbf{r}-\mathbf{r}_O)\times\mathbf{Q}\right) = \\
& = \dot{\mathbf{r}}\times\mathbf{Q} - \dot{\mathbf{r}}_O\times\mathbf{Q} + \mathbf{r}\times\dot{\mathbf{Q}} = \\
& = \underbrace{\dot{\mathbf{r}}\times m\dot{\mathbf{r}}}_{=\mathbf{0}} - \dot{\mathbf{r}}_O\times\mathbf{Q} + \mathbf{r}\times\mathbf{R}^{ext} = -\dot{\mathbf{r}}_O\times\mathbf{Q} + \mathbf{M}_O^{ext} \ .
\end{aligned} \tag{8.5}$$

Terza equazione cardinale – energia cinetica

$$K = \frac{1}{2}m|\mathbf{v}|^2 = \frac{1}{2}m\mathbf{v}\cdot\mathbf{v} \ . \tag{8.6}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}K = & \underbrace{m\dot{\mathbf{v}}}_{=\dot{\mathbf{Q}}}\cdot\mathbf{v} = \\
& = \dot{\mathbf{Q}}\cdot\mathbf{v} = \\
& = \mathbf{R}^{ext}\cdot\mathbf{v} = P^{ext} = P^{tot}
\end{aligned} \tag{8.7}$$

8.2.2 Moto di un sistema di punti materiali

Prima equazione cardinale L'equazione cardinale per il punto i-esimo,

$$\begin{aligned}
m_i\ddot{\mathbf{r}}_i = & \mathbf{R}_i^{ext,i} = \\
& = \mathbf{R}_i^{ext} + \mathbf{R}_i^{int} = \\
& = \mathbf{R}_i^{ext} + \sum_{j\neq i}\mathbf{F}_{ij}
\end{aligned} \tag{8.8}$$

Sommando le equazioni di tutti i punti, si ottiene

$$\underbrace{\sum_i m_i\ddot{\mathbf{r}}_i}_{m\ddot{\mathbf{r}}_G=\dot{\mathbf{Q}}} = \underbrace{\sum_i \mathbf{R}_i^{ext}}_{\mathbf{R}^{ext}} + \underbrace{\sum_i\sum_{j\neq i}\mathbf{F}_{ij}}_{=\mathbf{0}} \tag{8.9}$$

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{R}^{ext} \tag{8.10}$$

Seconda equazione cardinale

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt}\left((\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_O)\times m_i\dot{\mathbf{r}}_i\right) = (\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_O)\times\mathbf{R}_i^{ext,i} \\
& (\dot{\mathbf{r}}_i-\dot{\mathbf{r}}_O)\times m_i\dot{\mathbf{r}}_i + (\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_O)\times m_i\ddot{\mathbf{r}}_i = (\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_O)\times\left(\mathbf{R}_i^{ext} + \sum_{j\neq i}\mathbf{F}_{ij}\right) \\
& \sum_i(\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_O)\times m_i\ddot{\mathbf{r}}_i = \dot{\mathbf{r}}_O\times\mathbf{Q} + \mathbf{M}_O^{ext}
\end{aligned} \tag{8.11}$$

Per sistemi rigidi, per i quali vale $\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j = \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$

$$\begin{aligned}
\mathbf{\Gamma}_O &= \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_O) \times m_i \mathbf{v}_i = \\
&= \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G + \mathbf{r}_G - \mathbf{r}_O) \times m_i \left[\mathbf{v}_G + \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G)\right] = \\
&= \underbrace{\sum_i m_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G)}_{m\mathbf{r}_G - m\mathbf{r}_G = \mathbf{0}} \times \mathbf{v}_G + \underbrace{\sum_i m_i}_{=m}(\mathbf{r}_G - \mathbf{r}_O) \times \mathbf{v}_G + \\
&\quad + (\mathbf{r}_G - \mathbf{r}_0) \times \left(\mathbf{\Omega} \times \underbrace{\sum_i m_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G)}_{m\mathbf{r}_G - m\mathbf{r}_G = \mathbf{0}}\right) \underbrace{- \sum_i m_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times [(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times}_{=\mathbb{I}_G} \mathbf{\Omega}]
\end{aligned} \tag{8.12}$$

$$\mathbf{\Gamma}_O = (\mathbf{r}_G - \mathbf{r}_O) \times \mathbf{Q} + \mathbb{I}_G \cdot \mathbf{\Omega} \tag{8.13}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\left((\mathbf{r}_G - \mathbf{r}_O) \times \mathbf{Q}\right) &= (\mathbf{v}_G - \dot{\mathbf{r}}_O) \times \mathbf{Q} + (\mathbf{r}_G - \mathbf{r}_O) \times \dot{\mathbf{Q}} = \\
&= -\dot{\mathbf{r}}_O \times \mathbf{Q} + (\mathbf{r}_G - \mathbf{r}_O) \times \dot{\mathbf{Q}}
\end{aligned} \tag{8.14}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\left(\mathbb{I}_G \cdot \mathbf{\Omega}\right) = \frac{d}{dt}&\left(-\sum_i m_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times [(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{\Omega}]\right) = \\
&= -\sum_i m_i(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_G) \times [(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{\Omega}] + \\
&\quad - \sum_i m_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times [(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_G) \times \mathbf{\Omega}] + \\
&\quad - \sum_i m_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \left[(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \dot{\mathbf{\Omega}}\right] = \\
&= -\sum_i m_i \underbrace{[(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{\Omega}] \times [(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{\Omega}]}_{=\mathbf{0}} + \\
&\quad - \sum_i m_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times [(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_G) \times \mathbf{\Omega}] + \\
&\quad + \mathbb{I}_G \cdot \dot{\mathbf{\Omega}} \\
&= +\sum_i m_i \mathbf{\Omega} \times [(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \underbrace{(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_G)}_{\mathbf{\Omega} \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G)}] + \\
&\quad + \sum_i m_i \underbrace{(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_G) \times [\mathbf{\Omega} \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G)]}_{=\mathbf{0}} + \\
&\quad + \mathbb{I}_G \cdot \dot{\mathbf{\Omega}} \\
&= \mathbf{\Omega} \times \left(-\sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times [(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{\Omega}]\right) + \mathbb{I}_G \cdot \dot{\mathbf{\Omega}} = \\
&= \mathbb{I}_G \cdot \dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Omega} \times (\mathbb{I}_G \cdot \mathbf{\Omega})
\end{aligned} \tag{8.15}$$

Terza equazione cardinale

$$\begin{aligned}
\mathbf{v}_i \cdot m_i \dot{\mathbf{v}}_i &= \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{R}_i^{ext,i} \\
\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} m_i |\mathbf{v}_i|^2\right) &= \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{R}_i^{ext} + \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{R}_i^{int} = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{R}_i^{ext} + \mathbf{v}_i \cdot \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} \\
\frac{d}{dt} K_i &= P_i^{ext} + P_i^{int}
\end{aligned} \tag{8.16}$$

e sommando su tutti i punti,

$$\frac{d}{dt} K = P^{ext} + P^{int} \tag{8.17}$$

dove la potenza delle forze interne in generale non è nulla

$$P^{int} = \sum_i \mathbf{v}_i \cdot \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} = \sum_{\{i,j\}} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{F}_{ij} \ . \tag{8.18}$$

Nel caso di corpo rigido, si ottiene ...

8.2.3 Moto di un corpo rigido

Prima equazione cardinale

Seconda equazione cardinale

Terza equazione cardinale

9. Moti notevoli

In questo capitolo vengono indagati alcuni moti notevoli, espicitando le espressioni della quantità di moto, del momento angolare, le azioni esterne, e le condizioni iniziali proprie di ogni moto. Ogni moto verrà indagato dopo aver introdotto il **sistema di coordinate** più **adeguato** allo studio del sistema.

9.1 Moti di punti materiali

9.1.1 Moto rettilineo uniforme

Se la risultante delle forze esterne è nulla, la derivata nel tempo della quantità di moto è nulla. Il secondo principio della dinamica si riduce a

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{0} \qquad \begin{cases} \mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0 \\ \dot{\mathbf{r}}(0) = \mathbf{v}_0 \end{cases} \tag{9.1}$$

Introducendo un sistema di coordinate cartesiane Oxy, si può scrivere

$$\begin{cases} m\ddot{x} = 0 \\ m\ddot{y} = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} x(0) = x_0 \quad , \qquad \dot{x}(0) = v_{x,0} \\ y(0) = y_0 \quad , \qquad \dot{y}(0) = v_{y,0} \end{cases} \tag{9.2}$$

Legge del moto

$$\begin{cases} x(t) = v_{x,0}t + x_0 \\ y(t) = v_{y,0}t + y_0 \end{cases} \tag{9.3}$$

9.1.2 Moto di un proiettile in prossimità della superficie terrestre

Introducendo un sistema di coordinate cartesiane Oxy, con l'asse x diretto in direzione orizzontale, l'asse y in direzione verticale verso l'alto, si può scrivere

- la posizione del punto come $\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{x}} + y\hat{\mathbf{y}}$
- il campo di gravità come $\mathbf{g} = -g\hat{\mathbf{y}}$

$$m\ddot{\mathbf{r}} = m\mathbf{g} \qquad \begin{cases} \mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0 \\ \dot{\mathbf{r}}(0) = \mathbf{v}_0 \end{cases} \tag{9.4}$$

Utilizzando questo sistema di coordinate, si possono scrivere le coordinate dell'equazione della quantità di moto e delle condizioni iniziali,

$$\begin{cases} m\ddot{x} = 0 \\ m\ddot{y} = -mg \end{cases} \qquad \begin{cases} x(0) = x_0 \quad , \qquad \dot{x}(0) = v_{x,0} \\ y(0) = y_0 \quad , \qquad \dot{y}(0) = v_{y,0} \end{cases} \tag{9.5}$$

Legge del moto

$$\begin{cases} x(t) = v_{x,0} t + x_0 \\ y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{y,0} t + y_0 \end{cases} \tag{9.6}$$

9.1.3 Sistema massa-molla-smorzatore

Usando il secondo principio della dinamica

$$\begin{aligned} & m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \\ & x(0) = x_0 \\ & \dot{x}(0) = v_0 \end{aligned} \tag{9.7}$$

9.1.4 Moto circolare

9.1.5 Moto del pendolo

Usando la seconda equazione cardinale della dinamica

$$mL^2\ddot{\theta}(t) = -mgL\sin\theta(t) \ . \tag{9.8}$$

9.1.6 Moto di sistemi di punti

9.1.7 Moti dei corpi celesti

9.2 Moti di corpi estesi

IV Termodinamica

10. Principi della termodinamica

10.1 Primo principio

Il primo principio della termodinamica è il bilancio di energia totale del sistema: la variazione di energia totale di un sistema è uguale alla somma del calore entrante nel sistema dall'ambiente e del lavoro delle forze esterne agenti sul sistema. In forma incrementale

$$\Delta E^{tot} = Q^{ext} + L^{ext} \ , \tag{10.1}$$

$$\dot{E}^{tot} = \dot{Q}^{ext} + P^{ext} \ . \tag{10.2}$$

Usando il teorema dell'energia cinetica della meccanica,

$$\dot{K} = P^{tot} = P^{ext} + P^{int} \ , \tag{10.3}$$

e definendo l'energia interna U del sistema come differenza tra l'energia totale e l'energia cinetica,

$$U := E^{tot} - K \ , \tag{10.4}$$

si può ricavare un'equazione per il bilancio dell'energia interna

$$\dot{U} = \dot{Q}^{ext} - P^{int} \ . \tag{10.5}$$

10.2 Secondo principio

Il secondo principio della termodinamica introduce Il secondo principio della termodinamica ha diversi enunciati equivalenti, formulati da Clausis, Kelvin e Planck. L'enunciato più generale è quello di Clasius, mentre gli enunciati di Kelvin e Planck coinvolgono macchine termiche e quindi, per questi due enunciati, si rimanda al capitolo 12 sulle macchine termiche.

Si assume di poter separare il contributo della potenza delle forze interne P^{int} nella somma della potenza delle forze reversibili e in quella delle forze irreversibili, definita dissipazione, $P^{int} = P^{int,rev} + D$

$$\begin{aligned} dU &= \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_S dx + \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_x dS \\ dU &= \delta Q^{ext} - \delta L^{int} = \\ &= \delta Q^{ext} - \delta^r L^{int,r} + \underbrace{\delta^+ D}_{\geq 0} = \\ &= -\delta^r L^{int,r} + \delta Q^{ext} + \delta^+ D \end{aligned} \tag{10.6}$$

$$-\delta^r L^{int,r} = \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_S dx \qquad , \qquad \delta Q^{ext} + \delta^+ D = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_x dS \; . \tag{10.7}$$

Definendo la temperatura $T := \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_x > 0$, per il terzo principio, si può riscrivere

$$TdS = \delta Q^{ext} + \delta^+ D \geq \delta Q^{ext} \qquad \rightarrow \qquad dS \geq \frac{\delta Q^{ext}}{T} \; . \tag{10.8}$$

10.3 Terzo principio

Il terzo principio della termodinamica postula la positività della temperatura

$$T := \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_x > 0 \tag{10.9}$$

10.4 Principio zero - Equilibrio termico

11. Stati della materia e leggi costitutive

11.1 Gas

11.1.1 Legge dei gas perfetti

11.2 Solidi

12. Macchine termiche

13. Trasmissione del calore

V Elettromagnetismo

14. Introduzione

- carica e corrente elettrica, magneti:
  - esperimenti fondamentali
  - definizioni operative di campi elettrico e magnetico con cariche e bussole di prova
- definizioni di flusso e circuitazione
- principi
  - Equazioni di Maxwell:

$$\begin{cases} \Phi_{\partial V^*}(\mathbf{d}^*) = Q^{int}_{V^*} \\ \Gamma_{\partial S^*}(\mathbf{e}^*) + \dfrac{d}{dt}\Phi_{S^*}(\mathbf{b}^*) = 0 \\ \Phi_{\partial V^*}(\mathbf{b}^*) = 0 \\ \Gamma_{\partial S^*}(\mathbf{h}^*) - \dfrac{d}{dt}\Phi_{S^*}(\mathbf{d}^*) = \Phi_{S^*}(\mathbf{j}) \end{cases} \tag{14.1}$$

  - continuità della carica elettrica

$$\frac{d}{dt}Q^{int}_{V^*} + \Phi_{\partial V^*}(\mathbf{j}^*) = 0 \tag{14.2}$$

- approssimazione circuitale

VI
Relatività di Einstein - cenni

VII

Meccanica quantistica - cenni

Bibiliografia

A. Prima appendice

...