

CdS in Ingegneria Energetica, Università di Bologna

Programma dettagliato del corso di Fisica Generale T-A

prof. S. Pellegrini

Introduzione. Il metodo scientifico. Principi e leggi della Fisica. I modelli in Fisica. Grandezze fisiche e loro misurazione. Grandezze principali e derivate. Dimensioni delle grandezze fisiche. Leggi fisiche e analisi dimensionale. Sistemi di unità di misura SI e cgs. Incertezze associate alla misura: errori sistematici, errori casuali, risultato di una misurazione, cifre significative. Misure di tempo; il secondo. Misure di lunghezza; il metro. Misure di massa; il chilogrammo.

Calcolo vettoriale. Grandezze scalari e grandezze vettoriali. Notazioni e definizioni vettoriali. Somma e differenza di vettori; proprietà commutativa ed associativa. Prodotto di uno scalare per un vettore; dimensioni fisiche di grandezze vettoriali. Versori e direzioni orientate. Scomposizione di vettori; vettori componenti e parte scalare di un vettore. Prodotto scalare e sue proprietà. Proiezione ortogonale di un vettore lungo una direzione (individuata da un versore). Modulo della somma e modulo della differenza (legge di Carnot) di due vettori. Prodotto vettoriale: definizione e proprietà. Legge dei seni. Sistemi di riferimento e sistemi di coordinate. Rappresentazione cartesiana ortogonale di un vettore: terna ortogonale destra, scomposizione di un vettore lungo gli assi cartesiani, componenti cartesiane, coseni direttori, modulo, rappresentazione della direzione orientata di un vettore mediante il suo versore. Rappresentazione dei vettori tramite coordinate cartesiane, e tramite modulo e due angoli. Espressioni cartesiane delle operazioni fra vettori. Prodotto vettoriale triplo e prodotto misto e loro proprietà. Vettore posizione e sua rappresentazione in sistemi di coordinate cartesiane ortogonali e polari piane. Relazione fra versori cartesiani ortogonali e versori polari piani. Vettore spostamento e distanza.

Vettori applicati. Momento polare; invarianza del momento polare per spostamento del punto di applicazione del vettore lungo la sua retta d'azione. Momento assiale di un vettore applicato; indipendenza del momento assiale dalla scelta del polo lungo l'asse; contributo nullo al momento assiale da parte del componente del vettore parallela all'asse; casi di annullamento del momento assiale. Sistemi di vettori applicati: risultante e momento risultante. Vettori concorrenti ed espressione per il loro momento risultante. Dipendenza del momento risultante dalla scelta del polo; legge di variazione del momento risultante in funzione della scelta del polo. La coppia. Sistemi di vettori equivalenti; proprietà dell'equivalenza indipendente dalla scelta del polo.

Cinematica. Derivate di vettori. Derivata di vettore espressa in un sistema di riferimento cartesiano ortogonale fisso. Derivata di vettore di modulo costante. Derivate di versori e di vettori: modulo, direzione, verso. Il vettore $\vec{\omega}$ nell'espressione della derivata di un versore. Derivata di vettore generico: suoi componenti nella direzione del vettore stesso e nella direzione ortogonale (espresso tramite $\vec{\omega}$). La cinematica come descrizione del moto rispetto ad un sistema di riferimento (SdR); il modello del punto materiale. Equazione vettoriale del moto. Vettore posizione nella rappresentazione cartesiana ed intrinseca. Rappresentazione intrinseca della traiettoria: ascissa curvilinea e legge oraria. Il vettore velocità; velocità media ed istantanea. La velocità nella rappresentazione intrinseca della traiettoria; il versore tangente e la velocità scalare. Rappresentazione cartesiana della velocità. Accelerazione media ed istantanea e sua rappresentazione cartesiana.

Accelerazione e sua rappresentazione intrinseca: componente tangenziale e centripeta. Definizione e significato di integrale indefinito e definito, per funzione scalare e vettoriale. Il problema inverso della cinematica: derivazione dei vettori posizione e velocità a partire dal vettore accelerazione, e per specificati valori di posizione e velocità ad un tempo scelto. Classificazione dei moti: uniforme, uniformemente accelerato; rettilineo e circolare. Rappresentazione cartesiana ed intrinseca di posizione, velocità ed accelerazione, nel caso di moto circolare. Casi di moto circolare uniforme ed uniformemente accelerato. Il vettore velocità angolare $\vec{\omega}$; espressione tramite $\vec{\omega}$ sia della velocità che dell'accelerazione; il vettore accelerazione angolare $\vec{\alpha}$.

Moti periodici: proprietà generali (periodo, pulsazione, ampiezza, fase, fase iniziale) e determinazione delle costanti ampiezza e fase iniziale in funzione delle condizioni iniziali su posizione e velocità. Moto oscillatorio armonico: legge oraria, espressioni per posizione, velocità, accelerazione; differenza di fase tra elongazione, velocità ed accelerazione; punti di massimo e minimo per le parti scalari di elongazione, velocità ed accelerazione.

Il moto dei gravi come esempio di problema inverso della cinematica: vettori posizione e velocità, moto piano, casi particolari di velocità iniziale nulla o diretta come \mathbf{g} . Scrittura delle componenti $x(t)$, $y(t)$ e $v_x(t)$, $v_y(t)$; indipendenza dei moti lungo x e lungo y . Scrittura della traiettoria parabolica $y(x)$ nel caso di proiettile che parte dall'origine del SdR con velocità iniziale \mathbf{v}_0 non nulla, inclinata di un angolo rispetto all'orizzontale. Coordinate del punto di quota massima, velocità in essa; ascissa di atterraggio (gittata) e sua dipendenza dall'angolo di \mathbf{v}_0 con l'orizzontale, tempo di atterraggio, velocità all'atterraggio. Caso del proiettile con velocità iniziale nella sola direzione orizzontale v_{0x} , che parte da una certa quota: traiettoria, ascissa di atterraggio, tempo di caduta (indipendente da v_{0x}), velocità di atterraggio.

Moti relativi: trasformazione dei vettori posizione, velocità, accelerazione quando descritti in un SdR fisso e in uno mobile. Derivazione e significato delle espressioni per la velocità di trascinamento e per l'accelerazione di trascinamento. Accelerazione di Coriolis. Espressione per la velocità di trascinamento e per l'accelerazione di trascinamento nei casi particolari di: 1) $\vec{\omega} = 0$, traslazione relativa dei sistemi di riferimento; 2) $\vec{\omega} \neq 0$, sistemi in sola rotazione relativa. Espressione dei vettori posizione, velocità, accelerazione rispetto sistemi di riferimento in moto relativo rettilineo uniforme (trasformazioni di Galileo).

I principi della dinamica. Definizione di forza come causa del moto o di deformazione; forze a distanza e di contatto; punto di applicazione. La forza peso. Il dinamometro e la definizione operativa di forza. Carattere vettoriale della forza; principio di sovrapposizione delle forze. Concetti di quiete ed equilibrio. Vincoli e reazione vincolare; vincoli lisci e scabri. Il piano inclinato liscio e i componenti della forza peso ad esso parallelo e ortogonale. I tre principi fondamentali della meccanica newtoniana. Il principio di inerzia e i sistemi di riferimento inerziali; trasformazioni di Galileo. Il sistema di riferimento terrestre. Proporzionalità tra forza ed accelerazione: il secondo principio della dinamica e la massa inerziale. Il problema inverso della cinematica nota la forza, la massa, e le condizioni iniziali. Additività della massa inerziale. Unità di misura della forza

nei sistemi SI, cgs e pratico degli ingegneri. Massa inerziale e peso. Quantità di moto di un punto materiale e sua variazione per l'azione di una forza; generalizzazione del secondo principio. Impulso di una forza. Teorema dell'impulso. Momento angolare di un punto materiale rispetto un polo generico, e relazione con il momento della forza. Forze centrali e moti piani.

Applicazioni dei principi della dinamica. Forze applicate su corpi puntiformi e derivazione del moto risultante. Corpi appoggiati su superfici lisce, soggetti all'azione di forza costante (attiva o vincolare) applicata direttamente o mediante un filo; il concetto di tensione nel filo ideale. Tensione nel filo ideale fra due corpi vincolati. La macchina di Atwood e la misura di g . La forza peso come forza costante: caduta libera di un grave nel vuoto, moto del proiettile; moto lungo un piano inclinato liscio. Confronto fra le espressioni per il tempo di atterraggio e la velocità al suolo nei seguenti casi di moto soggetto solo alla forza peso: caduta libera, proiettile, lancio orizzontale, e caduta lungo piano inclinato. Moto in un mezzo che oppone una forza resistente descritta dalla legge di Stokes (attrito viscoso); soluzione per la velocità e velocità limite.

Forze elastiche e legge di Hooke; moto oscillatorio armonico di un corpo soggetto a forza elastica. Costante elastica della molla. Il pendolo semplice: soluzione per la posizione $s(t)$ nella rappresentazione intrinseca, per piccole oscillazioni; dipendenza del periodo dalla lunghezza del filo ed indipendenza dalla massa del corpo oscillante. Espressione della tensione del filo: contributi della forza centripeta e della componente del peso lungo il filo. Forze dipendenti dalla posizione (elastica e pendolo): similitudine nelle equazioni del moto e nella soluzione; determinazione delle costanti ampiezza massima e fase iniziale a partire dalle condizioni iniziali. L'interazione gravitazionale. Attrito radente statico; valore massimo R_r^{max} e sua dipendenza dalla forza di carico e dal coefficiente di attrito statico. Attrito radente dinamico: espressione per l'intensità, coefficiente di attrito dinamico, direzione e verso. Equilibrio e discesa lungo un piano inclinato scabro. Attrito statico e locomozione.

Dinamica dei moti circolari: descrizione in un SdR inerziale, utilizzando le componenti tangenziale e centripeta di accelerazione e forza. La forza centripeta: caso del pendolo conico (in cui è fornita dalla tensione del filo), caso dell'auto in curva (in cui è fornita dall'attrito radente statico), caso di curva sopraelevata (in cui è fornita dalla reazione vincolare della strada).

Sistemi di riferimento non inerziali e seconda legge di Newton. Forze vere e forze apparenti (o fittizie); espressioni per la forza di trascinamento e la forza di Coriolis. Dinamica nei sistemi di riferimento non inerziali: a bordo di un ascensore e su piattaforma rotante (caso del corpo trattenuto in rotazione da un filo o dall'attrito); descrizione delle forze nel SdR inerziale S e in quello non-inerziale S' . Deviazione prodotta dalla forza di Coriolis sulla traiettoria di un corpo lanciato in orizzontale su una piattaforma rotante.

L'energia ed il lavoro. Forme in cui si presenta l'energia, principio della sua conservazione per sistemi isolati, equivalenza fra energia (E) e lavoro (L). Definizione di lavoro per forza costante; lavoro resistente e motore. Derivazione del lavoro finito dall'integrazione su un percorso del lavoro elementare δL ; dipendenza del lavoro dal percorso, e dal sistema di riferimento. Proprietà additiva

dei lavori. Dimensioni e unità di misura del lavoro. Definizione di energia cinetica K e teorema delle forze vive. Dimensioni dell'energia. Forze conservative come forze il cui lavoro dipende solo dagli estremi del percorso. Forze posizionali. Necessarietà e sufficienza, affinché il lavoro dipenda solo dagli estremi del percorso, dell'esistenza di una funzione scalare della posizione V tale che $\delta L = -dV$; circuitazione nulla della forza conservativa. Definizione dell'energia potenziale V , a meno di una costante additiva arbitraria. Alcune forze conservative ed espressione delle relative energie potenziali (forza peso, forza elastica, forze centrali a simmetria sferica). Superfici equipotenziali e perpendicolarità della forza ad esse. L'attrito dinamico e la forza di resistenza viscosa come forze non conservative. Energia meccanica (E_M) e legge di conservazione dell'energia meccanica per forze conservative; variazione dell'energia meccanica nel caso di presenza di forze non conservative: uguaglianza tra lavoro delle forze non conservative e variazione di E_M . Trasformazione dell'energia da cinetica a potenziale e viceversa, per un singolo corpo (casi della caduta libera, discesa lungo traiettoria qualsiasi vincolata da superficie liscia, pendolo semplice). Energia cinetica e potenziale dell'oscillatore armonico: espressioni per V e K in funzione del tempo, e calcolo di E_M (costante del moto). Macchine semplici: forza resistente e forza motrice; vantaggio meccanico; caso della doppia carrucola e del piano inclinato. La potenza: definizione ed unità di misura.

Dinamica dei sistemi. Centro di massa (CM) per un sistema discreto. Densità di massa (volumetrica, superficiale e lineare), centro di massa di un sistema continuo; CM per sistemi omogenei (dipendenza dalla sola forma del sistema). Quantità di moto totale \mathbf{Q} di un sistema e primo teorema del CM. Forze interne ed esterne ad un sistema. Principio della conservazione di \mathbf{Q} per un sistema isolato e prima equazione cardinale della meccanica; secondo teorema del CM. Conservazione di \mathbf{Q} di un sistema: esempi di corpi collegati da molle, e dello sparo con un fucile. Momento angolare totale \mathbf{P} di un sistema. Principio della conservazione di \mathbf{P} per un sistema isolato e seconda equazione cardinale della meccanica. Equivalenza fra terzo principio della Dinamica e conservazione di \mathbf{Q} e \mathbf{P} per un sistema isolato. Terzo teorema del CM. Equazioni cardinali rispetto al CM. Sistemi di forze parallele e baricentro (come caso particolare di "centro delle forze parallele" per il sistema delle forze peso).

Moto rispetto al CM, in un SdR con origine nel CM: quantità di moto totale nulla rispetto tale SdR. Moto rispetto al CM in un SdR con origine nel CM e mobile con orientazione fissa rispetto ad un sistema di riferimento inerziale: teoremi di Koenig per l'energia cinetica ed il momento angolare; espressione della seconda equazione cardinale, con le sole forze vere, in tale SdR (non necessariamente inerziale). Teorema delle forze vive per un sistema. Energia potenziale gravitazionale di un sistema. Variazione di E_M di un sistema prodotta da forze interne ed esterne non conservative.

Il fenomeno dell'urto: le forze interne impulsive e la conservazione delle grandezze dinamiche \mathbf{Q} e \mathbf{P} negli urti. Casi di sistema isolato (o con forze esterne non impulsive), e vincolato. Classificazione degli urti in base alla variazione dell'energia cinetica: casi di urto elastico, anelastico, totalmente anelastico, "esplosivo". Perdita (massima) di energia cinetica nell'urto totalmente anelastico. Coefficiente di restituzione. Variazione della quantità di moto delle singole particelle negli urti uni-dimensionali. Urto elastico uni-dimensionale centrale: velocità dopo l'urto in funzione di quelle

prima dell'urto. Il pendolo balistico e la misurazione della velocità del proiettile.

Il corpo rigido. Definizione del modello fisico del corpo rigido. Cinematica del corpo rigido: moto generico come combinazione di moto di traslazione e rotazione attorno asse opportuno. Espressione delle velocità dei punti del corpo rispetto ad un SdR fisso, esterno al corpo. Espressioni per \mathbf{Q} e per \mathbf{P} nei casi di moto traslatorio del corpo rigido, e rotatorio con asse di rotazione fisso. Momento angolare totale \mathbf{P} di un sistema rigido ruotante attorno asse fisso, rispetto un punto dell'asse di rotazione: componenti parallelo \mathbf{P}_{\parallel} ed ortogonale \mathbf{P}_{\perp} all'asse di rotazione; precessione di \mathbf{P} attorno l'asse di rotazione; nullità di \mathbf{P}_{\perp} per corpi simmetrici rispetto l'asse. Il momento di inerzia assiale I ; valori di I per corpi di forma semplice, omogenei e simmetrici. Teorema di Huygens-Steiner. Moto di rototraslazione: espressione per la velocità di ogni punto del corpo come somma della velocità di traslazione del CM (\mathbf{v}_{CM}) e della velocità di rotazione attorno asse per il CM; caso del rotolamento puro, e velocità di avanzamento del CM (pari a $v_{CM} = \omega R$); espressione alternativa per la velocità dei punti del corpo considerando il moto come un rotolamento attorno asse di istantanea rotazione passante per il punto di contatto fra corpo e piano d'appoggio.

Momento della forza o torcente quale grandezza fisica che dipende dalla forza (suoi intensità, direzione, verso) e dal suo punto di applicazione; momento di inerzia assiale quale grandezza che dipende dalla massa e da come essa è distribuita attorno l'asse scelto. Dinamica dei sistemi rigidi rotanti attorno asse fisso (z): componente assiale dei termini che entrano nella seconda equazione cardinale (momento delle forze esterne e momento angolare), e derivazione della legge $M_z^{(e)} = I\alpha$; contributo al momento assiale delle forze da parte del solo componente delle forze ortogonale all'asse di rotazione. Equazioni cardinali rispetto un polo fisso: Analogie e differenze fra la prima equazione cardinale (moto di traslazione risultante da forze esterne, accelerazione e massa) e la seconda (moto di rotazione risultante dal momento delle forze esterne, accelerazione angolare e momento d'inerzia). Soluzione della seconda equazione cardinale per la carrucola massiva rotante per azione di un peso. Relazione fra accelerazione lineare ed accelerazione angolare. Conservazione del momento angolare assiale. Energia cinetica di un sistema rigido: componenti di traslazione e di rotazione. Lavoro delle forze agenti su sistemi rigidi: relazione fra lavoro elementare, momento delle forze e spostamento angolare, per il moto di rotazione; espressione generale per il lavoro elementare, nel caso di forze agenti sul corpo rigido che producono rototraslazione. Lavoro compiuto da forza costante applicata al bordo di un disco, e relazione con la variazione di energia cinetica del disco (teorema delle forze vive). Lavoro nullo da parte della forza di attrito radente statico nel rotolamento senza slittamento; conservazione dell'energia meccanica nella discesa (tramite puro rotolamento) di un corpo lungo piano inclinato scabro. Forze agenti, e loro momenti rispetto il CM, su un corpo trainato da forza orizzontale in modo da procedere tramite rototraslazione lungo un piano orizzontale scabro.

Statica dei sistemi rigidi: equilibrio, equazioni cardinali e condizioni sul risultante $\mathbf{F}^{(e)}$ ed il momento risultante $\mathbf{M}^{(e)}$ delle forze esterne. Indipendenza dalla scelta del polo per la condizione di nullità di $\mathbf{M}^{(e)}$.