

Roberto De Luca

Elementi di fisica

Apprendere il linguaggio dell'universo



Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse
un libro che **non pesa**
e si **adatta** alle dimensioni
del **tuoi lettore!**

▼
COLLEGATI AL SITO
EDISES.IT

▼
ACCEDI AL
MATERIALE DIDATTICO

▼
SEGUICI LE
ISTRUZIONI

Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edises.it** e attiva la tua **area riservata**. Potrai accedere alla **versione digitale** del testo e a ulteriori **materiale didattico**.

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie

Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.
L'accesso al materiale didattico sarà consentito **per 18 mesi**.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edises.it** e segui queste semplici istruzioni

▼
Se sei registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci email e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

▼
Se non sei già registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito **edises.it**
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edises.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*



Ulteriori materiali e strumenti didattici sono accessibili dalla propria **area riservata** secondo la procedura indicata nel frontespizio.

Dalla sezione **materiali e servizi** della tua area riservata potrai accedere a:

- **Ebook:** versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita Bookshelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire.

- **Software di simulazione:** un vastissimo database di quesiti a risposta multipla per effettuare esercitazioni sull'**intero programma** o su **argomenti specifici**.

L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito per **18 mesi**.

Roberto De Luca

Elementi di fisica

Apprendere il linguaggio dell'universo

Roberto De Luca

Elementi di fisica. Apprendere il linguaggio dell'universo

Copyright © 2023, EdiSES Edizioni S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

2027 2026 2025 2024 2023

Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata

A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale, del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.

L'Editore

L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti gli eventuali aventi diritto.

Stampato presso PrintSprint S.r.l. – Napoli

per conto della EdiSES Edizioni S.r.l. – Piazza Dante Alighieri, 89 – Napoli

www.edises.it

assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 156 0

I curatori, l'editore e tutti coloro in qualche modo coinvolti nella preparazione o pubblicazione di quest'opera hanno posto il massimo impegno per garantire che le informazioni ivi contenute siano corrette, compatibilmente con le conoscenze disponibili al momento della stampa; essi, tuttavia, non possono essere ritenuti responsabili dei risultati dell'utilizzo di tali informazioni e restano a disposizione per integrare la citazione delle fonti, qualora incompleta o imprecisa.

Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e correttive, sia riguardo alle citazioni che alle informazioni di cui sopra.

Prefazione

È possibile, per un docente di fisica, trasferire, almeno in parte, la propria passione per la disciplina ai futuri insegnanti? Questa domanda è di interesse sia per il mondo accademico sia per la società, la quale – oggi in modo ancora più esplicito – richiede alla Scuola un impegno sempre maggiore nella formazione del cittadino. Questa richiesta è giustificata dal fatto che le giovani generazioni saranno chiamate ad affrontare, nel prossimo futuro, sfide che forse non potevano essere immaginate fino a qualche decennio fa. Limitandoci al campo scientifico, possiamo menzionare, solo come esempio, il ruolo che lo sfruttamento delle fonti di energia gioca nell’ambito dell’assetto climatico del nostro Pianeta. Una nuova rivoluzione industriale, che veda utilizzate solo fonti rinnovabili di energia nell’intero processo produttivo, sarà possibile solo se le giovani generazioni avranno strumenti di analisi del mondo reale tali da permettere loro di sostenere un progresso tecnico-scientifico mirato al raggiungimento di questo obiettivo. Sarà quindi necessario il contributo di tutti per avanzare nella direzione di un futuro sostenibile. Infatti, se la maggior parte dei cittadini non sarà consapevole delle giuste scelte individuali e collettive da effettuare per agevolare un “progresso dell’umanità” che sia capace di armonizzarsi con l’intero ecosistema in cui l’uomo vive e opera, difficilmente tutti noi potremo godere di una serena e pacifica permanenza sul pianeta Terra.

Queste esigenze erano già chiare da molti anni a chi ha concepito questo libro di testo non come una collezione di ricette da proporre ai futuri docenti, ma come una guida allo studio per la costruzione di una conoscenza adeguata dei principi fondamentali della fisica classica. Queste stesse esigenze hanno guidato, negli ultimi anni, l’azione didattica dell’autore. Ad eccezione di un singolo esempio finale, nel quale si propone un’attività da svolgere in aula con gli alunni, in questo libro di testo si procede in modo graduale e sistematico alla lettura e alla comprensione del libro dell’universo, così come inteso da Galileo Galilei. Per fare ciò si introducono alcune nozioni essenziali di matematica, che costituisce la lingua nella quale questo *grandissimo libro* è scritto. Pertanto, nei primi due capitoli ci soffermeremo a considerare gli strumenti matematici di base che vanno dall’algebra vettoriale alla trigonometria e dalla geometria analitica alle funzioni elementari. Per questi due capitoli e per il terzo capitolo non verranno proposti esercizi (una raccolta dei quali sarà presente come capitolo finale). Nei capitoli che vanno dal terzo al nono, tratteremo la meccanica, iniziando dalle nozioni di cinematica, fino a considerare

brevemente i sistemi di punti materiali. Due capitoli saranno dedicati alla statica e alla dinamica dei fluidi, tre capitoli alla termodinamica. In un capitolo successivo si daranno cenni di acustica, in altri due capitoli si tratterà l'ottica geometrica. Cenni di elettromagnetismo verranno dati nei capitoli finali, a iniziare dall'elettrostatica e dalla magnetostatica, per finire con la percezione dei colori.

Il lettore comprenderà che non è stato possibile trattare approfonditamente ogni argomento. Ciononostante, si è voluto preservare, in ciò che si espone, il rigore proprio di una disciplina che fa del metodo scientifico un suo proprio punto cardine. Viene allora affidato ai docenti il compito di sviluppare unità didattiche sulla base del contenuto di questo libro, che si propone così anche come punto di riferimento futuro e non solo come guida allo studio negli anni dell'università.

Alla fine del libro si riporta una lista bibliografica di alcuni lavori pubblicati dall'autore, anche in collaborazione con altri colleghi, solo per dare al lettore la possibilità di approfondimento di alcuni argomenti specifici. Infatti, questo libro di testo non esisterebbe se l'autore non avesse meditato, nel corso degli anni, su questioni didattiche specifiche della disciplina.

Devo ringraziare quanti mi hanno sostenuto in questi anni non proprio semplici. Sappiamo tutti che esistono percorsi di vita individuali che si intrecciano, a volte in modo costruttivo, a volte no, con situazioni ed eventi di varia natura. Sono grato perciò a tutte quelle persone che, in vario modo, hanno reso il mio percorso meno faticoso e hanno saputo apprezzare gli sforzi fatti in ambito didattico e scientifico.

Infine, vorrei ringraziare quegli studenti che, con il loro impegno e con i loro preziosi commenti, mi hanno fatto comprendere che un libro a loro dedicato avrebbe potuto facilitare la loro azione nell'importante ruolo che si apprestano ad assumere in qualità di educatori. A tutti loro e, per estensione logica, per quanto detto in precedenza, all'intero genere umano auguro un luminoso futuro.

Roberto De Luca

Fisciano, 8 giugno 2023

Indice

Prefazione	III
CAPITOLO 1 – Algebra e vettori 1	
1.1 Equazioni e disequazioni di primo grado.....	1
1.2 Equazioni e disequazioni di secondo grado.....	4
1.3 Brevi cenni di calcolo combinatorio	6
1.4 Triangolo di Tartaglia e binomio di Newton	9
1.5 I vettori	11
1.5.1 Operazione con i vettori	12
1.5.2 La regola del parallelogramma	12
1.5.3 Il prodotto scalare	13
1.5.4 Teorema di Carnot sui triangoli	15
CAPITOLO 2 – Cenni di geometria analitica – Funzioni elementari 17	
2.1 La geometria analitica	17
2.1.1 La retta.....	17
2.1.2 Traslazioni	19
2.1.3 La parabola	21
2.1.4 L'ellisse e la circonferenza	23
2.1.5 L'iperbole	26
2.2 Le funzioni	27
2.2.1. Funzioni invertibili	29
2.2.2 Funzione composta	31
2.3 La funzione potenza	31
2.4 Le funzioni seno, coseno e tangente	32

2.5 La funzione esponenziale	35
2.6 La derivata di una funzione	36
CAPITOLO 3 – Grandezze fisiche e loro unità di misura 43	
3.1 La fisica	43
3.2 Il metodo scientifico	44
3.3 Grandezze fisiche e unità di misura.....	47
3.4 Grandezze fisiche scalari e vettoriali	49
3.5 Cifre significative	50
CAPITOLO 4 – Cinematica 53	
4.1 Il punto materiale	53
4.2 Vettore posizione, vettore spostamento, velocità media	54
4.3 Velocità istantanea	55
4.4 Accelerazione media e accelerazione istantanea.....	57
4.5 Moti rettilinei.....	58
4.4.1 Moto rettilineo uniforme	59
4.4.2 Moto rettilineo uniformemente accelerato	60
4.6 Moti in due dimensioni: il moto del proiettile	63
CAPITOLO 5 – Dinamica 69	
5.1 Prima legge di Newton: il principio di inerzia	69
5.2 Seconda legge di Newton	72
5.3 Terza legge di Newton	74
5.4 Alcune applicazioni della seconda legge di Newton.....	75
5.4.1 Equilibrio statico di un blocco su un tavolo.....	75
5.4.2 Equilibrio statico di un quadro appeso al muro	76
5.4.3 Il piano inclinato	78

CAPITOLO 6 – <u>Le forze</u>	81
6.1 L’attrazione gravitazionale	81
6.2 La forza di attrito	83
6.3 Il moto circolare.....	87
6.3.1 Il vettore posizione	87
6.3.2 La velocità	88
6.3.3 L’accelerazione	89
 CAPITOLO 7 – <u>Moti periodici</u>	95
7.1 Il moto armonico	95
7.2 La legge di Hooke.....	97
7.2.1 L’oscillatore armonico	98
7.3 Il pendolo semplice.....	102
7.4 Le leggi di Keplero.....	107
7.4.1 La prima legge di Keplero	107
7.4.2 La seconda legge di Keplero	108
7.4.3 La terza legge di Keplero	110
 CAPITOLO 8 – <u>Sistemi di riferimento</u>	113
8.1 Moti relativi	113
8.2 Sistemi di riferimento non inerziali	116
8.3 La forza centrifuga	118
 CAPITOLO 9 – <u>Il lavoro e l’energia</u>	125
9.1 Il teorema dell’energia cinetica	125
9.2 Forze conservative.....	129
9.2.1 La forza peso è conservativa	130
9.2.2 La forza d’attrito non è conservativa.....	130
9.2.3 La forza elastica è conservativa	131
9.3 L’energia meccanica	133

CAPITOLO 10 –Sistemi di punti materiali	139
10.1 Il centro di massa.....	139
10.2 Il teorema del centro di massa	142
10.2.1 La quantità di moto	143
10.2.2 L'equazione della dinamica	143
10.2.2 Conservazione della quantità di moto totale	144
10.3 Corpi rigidi	147
10.4 Momento angolare	148
10.4.1 Momento di una forza.....	150
10.5 Equazioni cardinali della dinamica	151
 CAPITOLO 11 –Statica dei fluidi.....	155
11.1 La pressione	155
11.1.1 La densità.....	156
11.1.2 La legge di Stevino	157
11.1.3 La pressione atmosferica.....	158
11.2 Il principio di Archimede.....	159
11.3 Il principio di Pascal	162
11.4 Il diavololetto di Cartesio.....	163
 CAPITOLO 12 – Fluidodinamica	167
12.1 Fluidi ideali.....	167
12.2 Equazione di continuità	168
12.3 Il teorema di Bernoulli	170
12.4 L'effetto Venturi	175
 CAPITOLO 13 – I gas perfetti	179
13.1 Teoria cinetica dei gas	179
13.2 Trasformazioni termodinamiche	183

13.2.1 Isoterme	184
13.2.2 Isocore	185
13.2.3 Isobare	186
13.2.4 Commento finale	187
13.3 Il calore specifico dei gas perfetti	188
CAPITOLO 14 – Concetti di termodinamica.....	
14.1 Il calore specifico di liquidi e solidi	191
14.2 Il lavoro in termodinamica	195
14.3 L'esperimento di Joule.....	196
14.4 Il primo principio della termodinamica	199
14.5 Calore specifico a pressione costante	200
CAPITOLO 15 – Macchine termiche ed entropia.....	
15.1 Macchine termiche	205
15.2 Il secondo principio della termodinamica	206
15.2.1 Enunciato di Clausius	207
15.2.2 Enunciato di Lord Kelvin	207
15.3 Trasformazioni reversibili e irreversibili	207
15.4 La macchina di Carnot	209
15.5 L'entropia.....	209
15.6 Ancora sul secondo principio della termodinamica	211
CAPITOLO 16 –Acustica	
16.1 Le onde sonore	217
16.2 Interferenza tra due onde viaggianti	220
16.3 Onde stazionarie.....	221
16.3.1 Cavità con entrambe le estremità aperte	222
16.3.2 Cavità con una estremità aperta	224

16.3.3 Strumenti a corda	226
16.4 Intensità sonora e livello sonoro	227
16.4.1 Il logaritmo	228
16.4.2 La scala in decibel	229
CAPITOLO 17 – Ottica geometrica.....	233
17.1 La riflessione	233
17.2 La rifrazione	239
17.2.1 Riflessione interna totale	242
17.2.2 Fibre ottiche	244
CAPITOLO 18 – Specchi e diottri.....	247
18.1 Specchi sferici	247
18.1.1 Specchi sferici concavi	248
18.1.2 Specchi sferici convessi.....	249
18.1.3 Immagini di oggetti estesi	251
18.2 Diottri e lenti.....	255
18.2.1 Diottri sferici concavi.....	255
18.2.2 Diottri sferici convessi	257
18.2.3 Lenti spesse e lenti sottili	258
18.2.4 Lenti sottili e difetti visivi.....	263
CAPITOLO 19 – Elettrostatica	265
19.1 La forza di Coulomb	266
19.2 Forza elettrica e forza gravitazionale	268
19.3 Il campo elettrico	270
19.4 Il principio di sovrapposizione degli effetti	272
19.5 La legge di Gauss	274
19.5.1 Il campo elettrico e il campo gravitazionale.....	276

CAPITOLO 20 – Il potenziale elettrico	279
20.1 L’energia potenziale elettrica	279
20.2 Differenza di potenziale e potenziale elettrico	281
20.2.1 Ancora sul principio di sovrapposizione degli effetti	282
20.2.2 Superfici equipotenziali	284
20.3 I conduttori	287
20.3.1 Il campo elettrico all’interno e all’esterno di un conduttore	288
20.3.2 Il potenziale elettrico di un conduttore sferico	290
20.3.3 Induzione elettrostatica	291
20.4 La capacità	293
20.4.1 Condensatori	294
20.4.2 Condensatori in serie e in parallelo	296
CAPITOLO 21 – Elettrodinamica	301
21.1 La corrente elettrica	301
21.2 Semiconduttori e superconduttori	305
21.3 Le leggi circuitali di Kirchhoff	307
21.4 Analisi di un semplice circuito elettrico	312
CAPITOLO 22 – Magnetismo	315
22.1 La forza di Lorentz	315
22.2 Sorgenti del campo magnetico	317
22.3 Il dipolo magnetico e la legge di Gauss per il magnetismo	320
22.4 Fili percorsi da corrente in campi magnetici	321
22.5 La legge di Ampère	324
22.6 Interazione tra dipoli magnetici	326
CAPITOLO 23 – Elettromagnetismo	329
23.1 Una versione estesa della forza di Lorentz	329

23.2 La legge di Faraday-Neumann-Lenz.....	331
23.3 Le equazioni di Maxwell nel vuoto	335
23.4 Onde elettromagnetiche	337
23.5 Lo spettro elettromagnetico.....	339
23.6 Radiometria, fotometria e intensità luminosa	341
CAPITOLO 24 – Luce e colori..... 345	
24.1 L’occhio umano e la percezione dei colori	345
24.2 Scomposizione della luce e sintesi additiva.....	347
24.2.1 La scomposizione della luce bianca.....	348
24.2.2 La sintesi additiva dei colori	350
24.3 Pigmenti e sintesi sottrattiva.....	351
24.4 Un’attività in aula	354
24.5 Una nota conclusiva	357
Esercizi	
E.1 Cinematica	359
E.2 Statica	361
E.3 Dinamica	362
E.4 Statica e dinamica dei fluidi.....	364
E.5 Termodinamica	366
E.6 Acustica.....	368
E.7 Ottica	368
E.8 Elettricità	369
E.9 Magnetismo.....	371
Bibliografia..... 373	

CAPITOLO 8

Sistemi di riferimento

Il nostro modo di pensare il moto dei corpi intorno a noi dipende dal sistema di riferimento che adottiamo. Per esempio, quando siamo seduti in un'auto in moto e non guardiamo fuori dal finestrino, siamo portati a pensare di essere fermi. Ecco che è sempre utile specificare il sistema di riferimento che stiamo adottando per descrivere il nostro stato di moto o quello dei corpi intorno a noi. In questo capitolo daremo uno sguardo più attento ai sistemi di riferimento e, in particolare, a come esprimere la seconda legge di Newton, nella forma in cui l'abbiamo enunciata nel Capitolo 4 per sistemi di riferimento inerziali, anche in sistemi di riferimento non inerziali. Scopriremo così l'esistenza delle cosiddette *forze apparenti* che possiamo spiegare per via della corretta interpretazione della seconda legge di Newton.

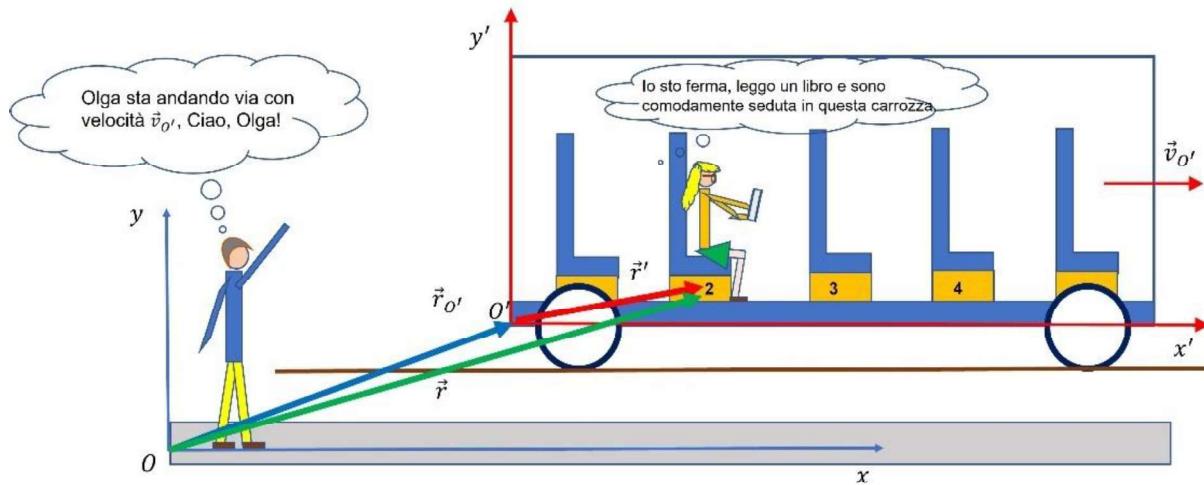


Figura 8.1 – Alla stazione Ottavio, fermo nel sistema di riferimento Oxy , saluta Olga che parte su un treno che viaggia a velocità $\vec{v}_{O'}$. Olga dice di essere ferma nel suo sistema di riferimento $O'x'y'$, mentre Ottavio dice che Olga si sta muovendo rispetto al sistema di riferimento Oxy .

8.1 Moti relativi

Prendiamo in considerazione la situazione illustrata in fig. 8.1. Ottavio è portato a pensare che Olga, che sta leggendo un libro comodamente seduta al posto n. 2 di una carrozza di un treno che viaggia a velocità $\vec{v}_{O'}$, si stia muovendo alla stessa velocità del treno. Olga, dal canto suo, sa di essere ferma. Entrambi i punti di vista sono corretti e vorremo adesso impegnare un poco della conoscenza da noi

acquisita nei primi capitoli di questo testo per comprendere più a fondo la questione.

Consideriamo allora la posizione di Olga rispetto al sistema $O'x'y'$ in modo da individuarla attraverso il vettore posizione \vec{r}' in rosso in fig. 8.1. Individuiamo la stessa posizione di Olga, questa volta rispetto al sistema Oxy , attraverso il vettore \vec{r} in verde in fig. 8.1. La posizione dell'origine O' rispetto ad O è individuata, infine, con il vettore posizione $\vec{r}_{O'}$ in blu in fig. 8.1. Ricordando il metodo punta-coda di addizione dei vettori, vediamo allora che è possibile scrivere:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_{O'}, \quad (8.1)$$

cosicché, per un semplice passaggio algebraico:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{r}_{O'}. \quad (8.2)$$

Questa relazione ci dice come si può passare da un sistema di riferimento Oxy a un sistema $O'x'y'$, in moto rispetto al primo. La (8.2) va sotto il nome di trasformazione galileiana delle coordinate. Adesso, notando che i due sistemi di riferimento condividono gli stessi versori \hat{x} e \hat{y} , che non mutano nel tempo, possiamo esprimere i vettori nella (8.2) in termini delle loro componenti x e y , ponendo

$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y}, \quad \vec{r}_{O'} = x_{O'}\hat{x} + y_{O'}\hat{y}, \quad \vec{r}' = x'\hat{x} + y'\hat{y}.$$

In questo modo la (8.2) può essere riscritta come segue:

$$x'\hat{x} + y'\hat{y} = (x - x_{O'})\hat{x} + (y - y_{O'})\hat{y}, \quad (8.3)$$

cosicché:

$$\begin{cases} x' = x - x_{O'} \\ y' = y - y_{O'} \end{cases}. \quad (8.4)$$

Derivando entrambi i membri della (8.2) rispetto al tempo, la legge di composizione delle velocità seguente:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_{O'}, \quad (8.5)$$

ove \vec{v}' è la velocità misurata rispetto al sistema di riferimento $O'x'y'$, \vec{v} è la velocità misurata rispetto al sistema di riferimento Oxy e $\vec{v}_{O'}$ è la velocità del punto O' rispetto al sistema di riferimento Oxy . Derivando, infine, entrambi i membri della (8.5) rispetto al tempo, otteniamo la legge di composizione delle accelerazioni:

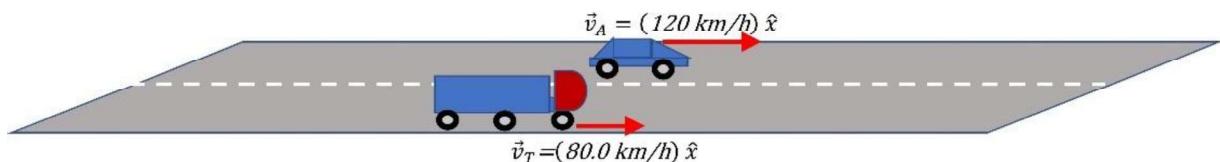
$$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{a}_{O'}, \quad (8.6)$$

ove \vec{a}' è l'accelerazione misurata rispetto al sistema di riferimento $O'x'y'$, \vec{a} è l'accelerazione misurata rispetto al sistema di riferimento Oxy e $\vec{a}_{O'}$ è l'accelerazione del punto O' rispetto al sistema di riferimento Oxy .

Queste espressioni ci permettono adesso di riflettere più a fondo sulla fig. 8.1. Prendendo in considerazione la (8.5), vediamo che dice Olga della sua velocità \vec{v}' misurata rispetto al sistema di riferimento $O'x'y'$. Ottavio vede Olga muoversi alla velocità del treno, cosicché $\vec{v} = \vec{v}_{O'}$. Sostituendo questa espressione nella (8.5) si vede allora che, effettivamente, $\vec{v}' = 0$.

Esempio 8.1

Un autotreno che viaggia a velocità $\vec{v}_T = 80.0 \frac{\text{Km}}{\text{h}} \hat{x}$ lungo un rettifilo, viene superato da un'auto che viaggia a velocità $\vec{v}_A = 120 \frac{\text{Km}}{\text{h}} \hat{x}$. Quanto vale la velocità dell'autotreno, così come vista dal finestrino dell'auto? Quanto vale la velocità dell'auto, così come vista dall'autista dell'autotreno?



Svolgimento Applicando la (8.5) identifichiamo dapprima \vec{v}_A con $\vec{v}_{O'}$ (l'auto è il nostro sistema di riferimento mobile ed essa si muove con velocità \vec{v}_A rispetto al suolo), mentre $\vec{v} = \vec{v}_T$ è la velocità dell'autotreno rispetto a un osservatore al suolo, cosicché si ha:

$$\vec{v}' = \vec{v}_T - \vec{v}_A = -40.0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \hat{x}.$$

La soluzione ci dice che l'autotreno è visto andare all'indietro, rispetto al versore \hat{x} , con una velocità in modulo pari a $40.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Ripetendo lo stesso ragionamento di sopra, si vede che l'auto è vista allontanarsi dall'autotreno, nella direzione di \hat{x} , con una velocità in modulo pari a $40.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

8.2 Sistemi di riferimento non inerziali

Quando abbiamo discusso la prima legge di Newton, abbiamo descritto, con le stesse parole di Galileo Galilei, un sistema di riferimento inerziale e abbiamo detto che per due sistemi di riferimento in moto relativo possiamo utilizzare le stesse leggi del moto (la seconda legge di Newton). Possiamo adesso far vedere che, se un sistema di riferimento $O'x'y'$ si muove di moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema di riferimento inerziale Oxy , le leggi della dinamica (la seconda legge di Newton) restano invariate in forma.

Partiamo allora col dire che, per descrivere il moto di una particella di massa m nel sistema di riferimento inerziale possiamo scrivere:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (8.7)$$

ove \vec{F} è la risultante delle forze che agiscono sulla particella. Nel sistema di riferimento $O'x'y'$ la velocità della particella è esprimibile come $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_{O'}$, con $\vec{v}_{O'}$ costante, per l'ipotesi fatta. Derivando rispetto al tempo possiamo scrivere:

$$\vec{a}' = \vec{a}. \quad (8.8)$$

Pertanto, poiché le forze e la massa della particella non cambiano per effetto del moto relativo, la (8.7) è valida anche nel sistema di riferimento $O'x'y'$.

Vediamo adesso che cosa succede in sistemi di riferimento non inerziali, ossia, in sistemi di riferimento $O'x'y'$ in moto relativo rispetto a un sistema di riferimento inerziale per il quale $\vec{a}_{O'} \neq 0$. Partendo dalla (8.7) e tenendo conto della (8.6) scriviamo

$$\vec{F} = m\vec{a}' + m\vec{a}_{O'}, \quad (8.9)$$

che possiamo riscrivere nella forma seguente:

$$\vec{F} - m\vec{a}_{O'} = m\vec{a}'. \quad (8.10)$$

Potremmo recuperare un'invarianza in forma della seconda legge di Newton se definissimo una nuova forza data dalla somma seguente:

$$\vec{F}' = \vec{F} - m\vec{a}_{O'}. \quad (8.11)$$

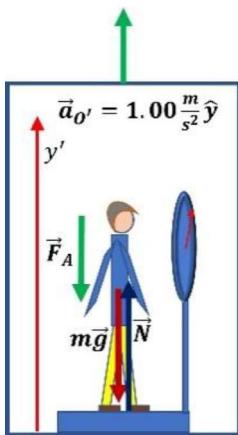
Mediante questa posizione, la (8.10) si riscrive come segue:

$$\vec{F}' = m\vec{a}', \quad (8.12)$$

in modo formalmente identico alla seconda legge di Newton. Tuttavia, per arrivare alla (8.12) abbiamo dovuto pagare uno scotto; ossia, abbiamo dovuto sommare alla

risultante \vec{F} delle forze reali, la *forza apparente* (o *fittizia*, o anche *inerziale*) $\vec{F}_A = -m\vec{a}_{O'}$. Vedremo come affrontare i problemi di dinamica in presenza di queste forze apparenti in alcuni esempi.

Esempio 8.2



Sul pavimento di un ascensore che si muove verso l'alto con un'accelerazione pari a $\vec{a}_{O'} = a_{O'} \hat{y} = 1.00 \frac{m}{s^2} \hat{y}$, ove \hat{y} è il versore verticale che punta verso l'alto, è poggiata una bilancia. Determinare la lettura della bilancia se su di essa sale una persona di 70.0 kg. Si risponda alla stessa domanda se $\vec{a}_{O'} = -a_{O'} \hat{y} = -1.00 \frac{m}{s^2} \hat{y}$.

Svolgimento Sull'ascensore, la persona è in equilibrio stabile. Pur tuttavia, il sistema di riferimento dell'ascensore non è un sistema di riferimento inerziale, cosicché usiamo la (8.12). Nel caso in cui $\vec{a}_{O'} = a_{O'} \hat{y} = 1.00 \frac{m}{s^2} \hat{y}$, si ha che la forza apparente sarà

$$\vec{F}_A = -m\vec{a}_{O'} = -ma_{O'} \hat{y}.$$

Poiché la persona è in equilibrio sulla bilancia, possiamo utilizzare la (8.12) con $\vec{a}' = 0$ e scrivere:

$$\vec{F}_A + \vec{N} + m\vec{g} = 0 \rightarrow \vec{N} = -m\vec{g} - \vec{F}_A.$$

Siccome la lettura della bilancia sarà proprio il modulo della reazione vincolare divisa per la costante g , ossia, sarà proprio la massa apparente m_A , risolviamo per \vec{N} e scriviamo:

$$\vec{N} = mg\hat{y} + ma_{O'}\hat{y} = m(g + a_{O'})\hat{y}.$$

E perciò, la massa apparente della persona sarà:

$$m_A = \frac{N}{g} = m \left(1 + \frac{a_{O'}}{g} \right) = 70.0 \text{ kg} \left(1 + \frac{1}{9.81} \right) = 77.1 \text{ kg}.$$

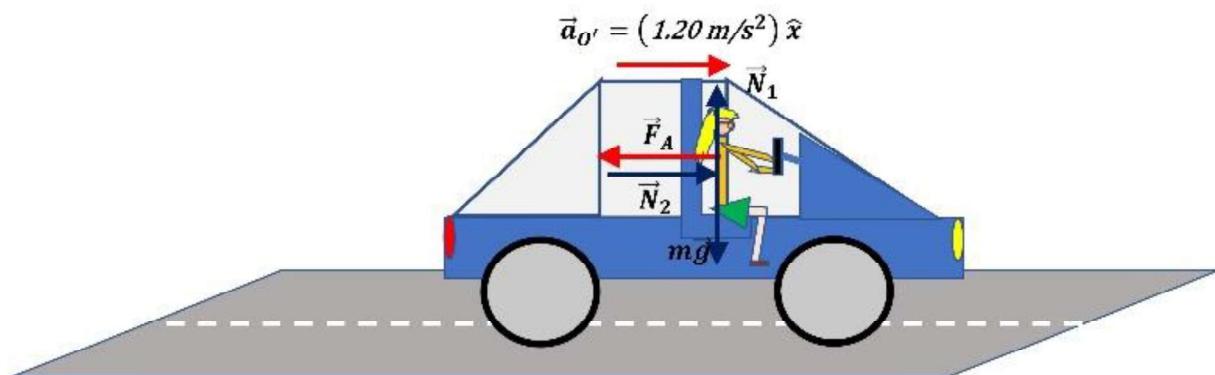
Nel caso l'ascensore accelerasse verso il basso, dovremmo solo cambiare di segno ad $a_{O'}$, ottenendo così:

$$\tilde{m}_A = m \left(1 - \frac{a_{O'}}{g} \right) = 70.0 \text{ kg} \left(1 - \frac{1}{9.81} \right) = 62.9 \text{ kg}.$$

Questo esempio è molto istruttivo, anche perché ci fa comprendere perché, quando portiamo una borsa in ascensore, il peso apparente della borsa stessa sembra aumentare quando l'ascensore inizia la sua salita.

Esempio 8.3

Olga, la cui massa è di 60.0 kg, guida la sua auto su di un rettilineo a velocità costante. A un certo istante di tempo preme il piede sull'acceleratore e la macchina prende a procedere con accelerazione pari a $\vec{a}_{O'} = a_{O'} \hat{x} = 1.20 \frac{m}{s^2} \hat{x}$, ove \hat{x} è il versore orizzontale che punta verso destra, nel senso di marcia. Determinare la reazione vincolare con cui lo schienale agisce su Olga per sostenerla.



Svolgimento Le forze che agiscono su Olga sono rappresentate in figura. La reazione vincolare \vec{N}_1 sostiene il peso di Olga, mentre la reazione vincolare \vec{N}_2 deve controbilanciare la forza apparente $\vec{F}_A = -m\vec{a}_{O'} = -ma_{O'}\hat{x}$. Pertanto, scrivendo la (8.12) con $\vec{a}' = 0$, nella sola direzione x avremo:

$$-ma_{O'} + N_2 = 0 \rightarrow N_2 = ma_{O'} = 72.0 \text{ N}.$$

8.3 La forza centrifuga

Tra le forze apparenti più note, la forza centrifuga gioca un ruolo preminente. Essa si manifesta quando un corpo si muove di moto curvilineo. In questa sezione analizzeremo solo il caso del moto circolare uniforme per semplicità.

Immaginiamo che un punto materiale, legato a un filo di lunghezza l , sia posto in rotazione rispetto a un asse verticale passante per il punto O , con velocità angolare ω , così come mostrato nella fig. 8.2. In un sistema di riferimento solidale con il punto O , tenendo conto della forza peso $m\vec{g}$ e della tensione nel filo \vec{T} , indicate con vettori verdi in fig. 8.2, possiamo scrivere la seconda legge di Newton come

Roberto De Luca

Elementi di fisica

Apprendere il linguaggio dell'universo

Accedi all'**ebook** e ai
contenuti digitali ➤ **Espandi** le tue risorse ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta**
alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi.
L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.