

Comprende  
versione Ebook  
e Software di simulazione



P. Mazzoldi • M. Nigro • C. Voci

# Fisica

## Meccanica e Termodinamica

III Edizione

a cura di  
S. Atzeni  
F. Michelotti





# Accedi all'ebook ai contenuti digitali

## Espandi le tue risorse

un libro che **non pesa**  
e si **adatta** alle dimensioni  
del **tuo lettore!**



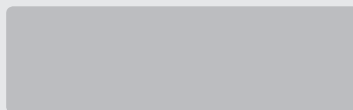
COLLEGATI AL SITO  
**EDISESUNIVERSITA.IT**

ACCEDI AL  
**MATERIALE DIDATTICO**

SEGUI LE  
**ISTRUZIONI**

Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e attiva la tua **area riservata**. Potrai accedere alla **versione digitale** del testo e a ulteriore **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 **edisesuniversita.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 o autenticali tramite facebook
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edisesuniversita.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**.

P. Mazzoldi · M. Nigro · C. Voci

# FISICA

VOLUME I

## Meccanica e Termodinamica

TERZA EDIZIONE

Edizione a cura di S. Atzeni, F. Michelotti

*Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*



P. Mazzoldi · M. Nigro · C. Voci  
FISICA – Volume I – Meccanica e Termodinamica – III Edizione  
a cura di S. Atzeni, F. Michelotti

Copyright © 2023, 1998, 1991 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.*

*In copertina*

Luglio 2021 – Decollo del lanciatore Ariane 5 dallo spazioporto europeo della Guyana francese. ESA – S. Corvaja

*Fotocomposizione*

domabook di Massimo Di Grazia – Napoli

*Stampato presso la*

Tipografia Sograte S.r.l. – Zona Ind. Regnano – Città di Castello (PG)

*per conto della*

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

[www.edises.it](http://www.edises.it)

[assistenza.edises.it](mailto:assistenza.edises.it)

ISBN 978 88 3623 067 9

---

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/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma [assistenza.edises.it](mailto:assistenza.edises.it)

# PREFAZIONE alla terza edizione

Nel 1991, all'uscita della prima edizione del Volume 1 del corso di Fisica, gli Autori del testo presentavano il lavoro come segue.

*Questo testo ha origine dalla nostra esperienza didattica maturata in anni di insegnamento dei corsi di Fisica Generale presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova. Anche se validissimi testi sono disponibili siamo indotti ad aggiungere un contributo all'insegnamento della Fisica Generale dall'esame della realtà universitaria di questi ultimi anni.*

*L'ordinamento delle lezioni è diventato semestrale per la maggior parte dei corsi di laurea di materie scientifiche, con la conseguente limitazione di orario a circa 150 ore tra corso di teoria ed esercizi, quasi sempre irraggiungibili a causa di assemblee, elezioni ed altri eventi vari.*

*Così, accanto all'innegabile vantaggio di poter tenere il corso di Fisica Generale dopo il corso di Analisi Matematica, ci si trova però nella necessità di uno svolgimento contratto e senza pause del programma, con tutte le difficoltà che ciò comporta per un adeguato apprendimento.*

*Il numero di studenti, soprattutto nei corsi di laurea in Ingegneria, è aumentato spesso oltre la capacità di ricezione delle strutture universitarie e la preparazione fisico-matematica di questi studenti è molto varia e purtroppo sovente superficiale o troppo settoriale.*

*D'altra parte i programmi, pur essendo stati sfrondata di nozioni accessorie, nella sostanza sono rimasti gli stessi, le esercitazioni numeriche hanno acquistato maggior spazio e importanza e la trattazione dei vari argomenti è stata mantenuta in generale ad un livello adeguato.*

*Una conseguenza di questi fatti è che l'impatto degli studenti con corsi affollati, ritmi di apprendimento sostenuti e difficoltà intrinseche delle materie provoca un allungamento dei tempi di superamento degli esami, se non addirittura l'abbandono degli studi.*

*Ci siamo pertanto proposti di aiutare lo studente a superare qualcuno dei problemi sopra accennati fornendogli uno strumento di studio che innanzi tutto indichi con chiarezza le nozioni fondamentali e sia realmente di guida alla comprensione ed alla risoluzione degli esercizi. Abbiamo però mantenuto nel testo tutti gli argomenti tradizionali, che formano la base culturale della Fisica Generale e sono di naturale riferimento per molti corsi successivi, anche se non è possibile svolgerli nella loro completezza in un solo semestre.*

*Speriamo di aver lavorato utilmente nell'interesse degli studenti. Saremmo soddisfatti se durante lo studio lo studente acquistasse interesse per la materia e, raggiunto lo scopo primario di superare l'esame, fosse consapevole dell'importanza della Fisica Generale per i suoi studi successivi e la sua formazione culturale.*

Paolo Mazzoldi, Massimo Nigro, Cesare Voci

Le parole degli Autori sono ancora assolutamente valide al giorno d'oggi, fatta eccezione per la durata dei corsi che si è ulteriormente ridotta a 9/12 crediti, ovvero 90/120 ore di lezione/esercitazione in aula.

Dopo la pubblicazione di una seconda edizione ed alcune ristampe con minime modifiche, abbiamo ora il piacere di presentare la terza edizione del testo da noi curata e basata sulla nostra esperienza didattica presso le Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza". La riscrittura del testo ha comportato un cambiamento dell'ordine di presentazione di alcuni argomenti, l'introduzione del capitolo 10, in cui si tratta estesamente la propagazione delle onde meccaniche, e del capitolo 11, in cui sono confluite tutte le considerazioni di meccanica relativistica. Abbiamo inoltre realizzato ed inserito il nuovo capitolo 12, in cui si forniscono elementi di meccanica analitica e di meccanica quantistica. Ogni capitolo è ora chiuso da un riepilogo dei concetti principali e da una sezione di quesiti, mediante i quali lo studente può mettere alla prova il proprio grado di apprendimento. I problemi numerici sono ora proposti alla fine di ogni capitolo.

Il testo è diviso in due parti, meccanica e termodinamica. I contenuti esposti sono abbastanza vasti ma organizzati in modo tale da poter estrarre facilmente un solido programma minimo, se a ciò si fosse costretti per vincoli sulla durata temporale dei corsi.

I capitoli iniziali della parte di meccanica (capitoli 1-4), dedicati al moto del punto materiale, sono piuttosto estesi, confermando l'intenzione originale degli autori di discutere a fondo le metodologie con cui si affronta un fenomeno fisico e il loro legame con l'analisi matematica. La meccanica dei sistemi di punti materiali (capitolo 5) completa gli argomenti di carattere generale. Ad essa segue l'esposizione della teoria newtoniana della gravitazione (capitolo 6), della meccanica del corpo rigido (capitolo 7), trattata in modo esteso e con numerosi esempi, di elementi di elasticità (capitolo 8), di meccanica dei fluidi (capitolo 9) e delle onde meccaniche (capitolo 10). La parte di meccanica si conclude con due capitoli dedicati ad elementi di meccanica relativistica (capitolo 11) e di meccanica analitica e quantistica (capitolo 12). Il materiale presentato nei capitoli 6, 8, 9, 10 è più vasto di quello che normalmente si riesce a svolgere in un corso del primo anno ma, a nostro avviso, le parti essenziali non dovrebbero essere trascurate. I capitoli 11 e 12 completano idealmente la preparazione di un moderno studente e forniscono le conoscenze di base per affrontare argomenti più avanzati.

La parte di termodinamica è costituita dai quattro capitoli finali (capitoli 13-16). In linea con le edizioni precedenti, essa viene trattata in modo classico, senza riferimento esplicito a concetti di meccanica statistica. Nel capitolo 13 vengono introdotti i concetti di temperatura e calore e si discute il primo principio. Il capitolo 14 contiene le applicazioni relative ai gas e comprende argomenti di teoria cinetica. Al secondo principio e all'entropia è dedicato il capitolo 15, mentre il capitolo 16, che apre le porte verso una trattazione della termodinamica classica più avanzata, riguarda i potenziali termodinamici e le proprietà generali dei sistemi  $pVT$ .

Ringraziamo Massimo Nigro per la fiducia che ha riposto nel nostro operato e l'entusiasmo con cui ha accolto le nostre proposte di aggiornamento ed integrazione del testo. Il nostro pensiero va a Paolo Mazzoldi e Cesare Voci che non sono più tra di noi e che purtroppo non potranno apprezzare questa nuova edizione. Ringraziamo, in particolare, i nostri colleghi di dipartimento Emilio N.M. Cirillo e Marco Centini per suggerimenti relativi alla stesura del nuovo capitolo sugli elementi di meccanica analitica e quantistica. Ringraziamo infine i colleghi Rita Iotti e Giovanni Barbero, curatori della nuova edizione del Volume 2 del testo dedicato all'elettromagnetismo, con i quali ci siamo confrontati per uniformare contenuti e notazioni.

Abbiamo riposto molta attenzione alla correttezza dei testi e alla qualità delle immagini. Ciononostante, il testo potrebbe essere affetto da refusi o imprecisioni; saremo grati a quanti vorranno segnalarne la presenza, insieme ad eventuali commenti e osservazioni.

Roma, 15 Marzo 2022

Stefano ATZENI e Francesco MICHELOTTI  
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"



# INDICE GENERALE

|                 |     |
|-----------------|-----|
| Prefazione..... | III |
| Premessa.....   | XI  |

## CAPITOLO 1

### Cinematica del punto materiale

|   |    |
|---|----|
| 1.1 Legge oraria e traiettoria.....                                       | 1  |
| 1.2 Moto rettilineo.....  | 2  |
| 1.3 Velocità nel moto rettilineo.....                                     | 4  |
| <i>Moto rettilineo uniforme</i> .....                                     | 6  |
| 1.4 Accelerazione nel moto rettilineo.....                                | 7  |
| <i>Moto rettilineo uniformemente accelerato</i> .....                     | 8  |
| 1.5 Moto verticale di un corpo nel campo di gravità.....                  | 11 |
| 1.6 Moto armonico semplice.....   | 13 |
| 1.7 Paradosso di Zenone. Commento sul calcolo infinitesimale.....         | 15 |
| 1.8 Moto nel piano. Posizione e velocità vettoriali.....                  | 16 |
| <i>Componenti cartesiane della velocità vettoriale</i> .....              | 18 |
| <i>Componenti polari della velocità vettoriale</i> .....                  | 18 |
| 1.9 Accelerazione vettoriale nel moto piano.....                          | 19 |
| <i>Componenti cartesiane dell'accelerazione</i> .....                     | 20 |
| <i>Componenti polari dell'accelerazione</i> .....                         | 21 |
| 1.10 Moto circolare.....  | 21 |
| <i>Notazione vettoriale</i> .....   | 24 |
| 1.11 Moto parabolico dei corpi nel campo di gravità (moto dei gravi)..... | 25 |
| 1.12 Moto nello spazio.....   | 28 |
| <i>Composizione di moti nel piano e nello spazio</i> .....                | 28 |
| 1.13 Considerazioni conclusive.....                                       | 30 |
| Riepilogo.....  | 32 |
| Quesiti.....  | 33 |
| Problemi.....   | 34 |

## CAPITOLO 2

### Dinamica del punto materiale

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Principio d'inerzia di Galilei. Introduzione al concetto di forza..... | 37 |
| 2.2 Leggi di Newton.....   | 38 |
| 2.3 Quantità di moto. Impulso.....   | 40 |
| 2.4 Risultante delle forze. Equilibrio. Reazioni vincolari.....            | 42 |
| <i>Reazioni vincolari</i> .....  | 43 |
| 2.5 Classificazione delle forze.....                                       | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 2.6 Azione dinamica delle forze.....                            | 45 |
| 2.7 Forza peso.....   | 46 |
| <i>Sensazione di peso</i> .....                                 | 46 |
| 2.8 Forza di attrito radente.....                               | 47 |
| 2.9 Piano inclinato.....  | 51 |
| 2.10 Forza elastica.....  | 53 |
| <i>Moto di un punto in presenza di una forza elastica</i> ..... | 55 |
| 2.11 Forza di attrito viscoso.....                              | 56 |
| 2.12 Forze centripete.....                                      | 57 |
| 2.13 Pendolo semplice.....                                      | 59 |
| 2.14 Tensione dei fili.....                                     | 61 |
| 2.15 Lavoro. Potenza. Energia cinetica.....                     | 65 |
| <i>Potenza</i> .....  | 66 |
| <i>Energia cinetica</i> .....                                   | 66 |
| 2.16 Lavoro della forza peso.....                               | 68 |
| <i>Lavoro di una forza costante</i> .....                       | 69 |
| 2.17 Lavoro di una forza elastica.....                          | 69 |
| 2.18 Lavoro di una forza di attrito radente.....                | 70 |
| 2.19 Forze conservative. Energia potenziale.....                | 71 |
| 2.20 Conservazione dell'energia meccanica.....                  | 73 |
| 2.21 Relazione tra energia potenziale e forza.....              | 77 |
| 2.22 Momento angolare. Momento della forza.....                 | 79 |
| <i>Teorema del momento angolare</i> .....                       | 80 |
| 2.23 Forze centrali.....  | 82 |
| 2.24 Considerazioni conclusive.....                             | 83 |
| Riepilogo.....  | 85 |
| Quesiti.....  | 87 |
| Problemi.....   | 87 |

## CAPITOLO 3

### Moti relativi in meccanica classica

|  |     |
|--|-----|
| 3.1 Sistemi di riferimento. Velocità e accelerazioni relative.....     | 93  |
| <i>Teorema delle velocità relative</i> .....                           | 94  |
| <i>Teorema delle accelerazioni relative</i> .....                      | 95  |
| <i>Velocità e accelerazione di un punto rispetto ad un altro</i> ..... | 96  |
| 3.2 Sistemi di riferimento inerziali. Relatività galileiana.....       | 97  |
| 3.3 Sistemi inerziali. Moto di trascinamento rettilineo uniforme.....  | 98  |
| 3.4 Dinamica in sistemi non inerziali. Forze apparenti.....            | 100 |

## VI Indice generale

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 3.5 | Moto di trascinamento rettilineo uniformemente accelerato . . . . . | 102 |
| 3.6 | Moto di trascinamento rotatorio uniforme . . . . .                  | 105 |
| 3.7 | Il moto rispetto alla Terra . . . . .                               | 108 |
|     | <i>Correzioni non inerziali sulla Terra</i> . . . . .               | 108 |
| 3.8 | Considerazioni conclusive e note . . . . .                          | 110 |
|     | Riepilogo . . . . .   | 113 |
|     | Quesiti . . . . .   | 113 |
|     | Problemi . . . . .  | 114 |

## CAPITOLO 4

### Oscillazioni armoniche

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Richiamo delle proprietà fondamentali dell'oscillatore armonico . . . . .  | 117 |
| 4.2 | Proprietà dell'equazione differenziale dell'oscillatore armonico . . . . . | 118 |
| 4.3 | Energia dell'oscillatore armonico . . . . .                                | 120 |
| 4.4 | Composizione di moti armonici lungo lo stesso asse . . . . .               | 122 |
|     | <i>Pulsazioni uguali</i> . . . . .   | 123 |
|     | <i>Pulsazioni diverse</i> . . . . .  | 124 |
| 4.5 | Composizione di moti armonici lungo assi ortogonali . . . . .              | 126 |
| 4.6 | Oscillatore armonico smorzato da una forza di attrito viscoso . . . . .    | 127 |
|     | <i>Primo caso: smorzamento forte</i> . . . . .                             | 128 |
|     | <i>Secondo caso: smorzamento critico</i> . . . . .                         | 128 |
|     | <i>Terzo caso: smorzamento debole</i> . . . . .                            | 129 |
| 4.7 | Oscillatore armonico forzato . . . . .                                     | 130 |
|     | <i>Studio della risposta in funzione di <math>\omega</math></i> . . . . .  | 131 |
|     | <i>Potenza media fornita dalla forza</i> . . . . .                         | 132 |
|     | <i>Alcune considerazioni sul fenomeno della risonanza</i> . . . . .        | 133 |
| 4.8 | Oscillatore armonico smorzato da una forza di attrito costante . . . . .   | 133 |
| 4.9 | Analisi di Fourier . . . . .   | 135 |
|     | Riepilogo . . . . .  | 137 |
|     | Quesiti . . . . .  | 138 |
|     | Problemi . . . . .   | 138 |

## CAPITOLO 5

### Dinamica dei sistemi di punti materiali

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 5.1 | Sistemi di punti materiali. Forze interne e forze esterne . . . . .                    | 141 |
| 5.2 | Centro di massa di un sistema di punti. Teorema del moto del centro di massa . . . . . | 143 |
| 5.3 | Conservazione della quantità di moto . . . . .   | 146 |
| 5.4 | Teorema del momento angolare . . . . .   | 148 |
| 5.5 | Conservazione del momento angolare . . . . .   | 150 |
| 5.6 | Sistema di riferimento del centro di massa . . . . .                                   | 151 |
| 5.7 | Teoremi di König . . . . .   | 152 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
|      | <i>Teorema di König per il momento angolare</i> . . . . .              | 152 |
|      | <i>Teorema di König per l'energia cinetica</i> . . . . .               | 153 |
|      | <i>Commento sui teoremi di König</i> . . . . .                         | 153 |
| 5.8  | Teorema dell'energia cinetica . . . . .                                | 155 |
| 5.9  | Riepilogo della dinamica dei sistemi di punti materiali . . . . .      | 157 |
| 5.10 | Urti tra due punti materiali . . . . .                                 | 158 |
|      | <i>Sistema del laboratorio e sistema del centro di massa</i> . . . . . | 160 |
| 5.11 | Urto completamente anelastico . . . . .                                | 160 |
| 5.12 | Urto elastico . . . . .  | 163 |
| 5.13 | Urto anelastico . . . . .  | 166 |
| 5.14 | Ulteriori nozioni sugli urti . . . . .                                 | 167 |
| 5.15 | Proprietà dei sistemi di forze applicate a punti diversi . . . . .     | 169 |
|      | <i>Sistemi di forze parallele</i> . . . . .                            | 170 |
|      | <i>Momento assiale</i> . . . . .                                       | 171 |
| 5.16 | Massa variabile . . . . .  | 171 |
|      | Riepilogo . . . . .  | 173 |
|      | Quesiti . . . . .  | 174 |
|      | Problemi . . . . .   | 175 |

## CAPITOLO 6

### Gravitazione

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 6.1 | Forza gravitazionale . . . . .                               | 179 |
| 6.2 | Massa inerziale e massa gravitazionale . . . . .             | 182 |
| 6.3 | Campo gravitazionale . . . . .                               | 183 |
| 6.4 | Energia potenziale gravitazionale . . . . .                  | 184 |
| 6.5 | Teorema di Gauss. Distribuzione sferica di massa . . . . .   | 188 |
| 6.6 | Moto dei pianeti. Determinazione della traiettoria . . . . . | 192 |
|     | <i>Equazione del moto. Traiettoria</i> . . . . .             | 193 |
|     | <i>Momento angolare. Energia</i> . . . . .                   | 194 |
|     | <i>Grafici dell'energia</i> . . . . .                        | 196 |
| 6.7 | Cenni di relatività generale . . . . .                       | 197 |
| 6.8 | Considerazioni conclusive . . . . .                          | 198 |
|     | Riepilogo . . . . .  | 199 |
|     | Quesiti . . . . .  | 200 |
|     | Problemi . . . . .   | 200 |

## CAPITOLO 7

### Dinamica del corpo rigido. Cenni di statica

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 7.1 | Definizione di corpo rigido. Prime proprietà . . . . .                                     | 202 |
| 7.2 | Moto di un corpo rigido . . . . .  | 204 |
| 7.3 | Corpo continuo. Densità. Posizione del centro di massa . . . . .                           | 207 |
|     | <i>Calcolo della posizione del centro di massa</i> . . . . .                               | 208 |
|     | <i>Centro di massa e forza peso</i> . . . . .  | 211 |
| 7.4 | Rotazioni rigide attorno ad un asse fisso in un sistema di riferimento inerziale . . . . . | 212 |