

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**
  - ▼ SEGUICI 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 autenticati 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](http://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 130 ore tra corso di teoria ed esercizi, quasi sempre irraggiungibili a causa di assemblee, elezioni ed altri eventi vari.*

*Così, accanto all'inevitabile 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 sfondati 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 Paradossalio 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 Princípio 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

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
	Correzioni non inerziali sulla Terra . . . . .	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
	Pulsazioni uguali . . . . .	123
	Pulsazioni diverse . . . . .	124
4.5	Composizione di moti armonici lungo assi ortogonali . . . . .	126
4.6	Oscillatore armonico smorzato da una forza di attrito viscoso . . . . .	127
	Primo caso: smorzamento forte . . . . .	128
	Secondo caso: smorzamento critico . . . . .	128
	Terzo caso: smorzamento debole . . . . .	129
4.7	Oscillatore armonico forzato . . . . .	130
	Studio della risposta in funzione di $\omega$ . . . . .	131
	Potenza media fornita dalla forza . . . . .	132
	Alcune considerazioni sul fenomeno della risonanza . . . . .	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

	Teorema di König per il momento angolare . . . . .	152
	Teorema di König per l'energia cinetica . . . . .	153
	Commento sui teoremi di König . . . . .	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
	Sistema del laboratorio e sistema del centro di massa . . . . .	160
5.11	Urti completamente anelastici . . . . .	160
5.12	Urti elasticici . . . . .	163
5.13	Urti anelastici . . . . .	166
5.14	Ulteriori nozioni sugli urti . . . . .	167
5.15	Proprietà dei sistemi di forze applicate a punti diversi . . . . .	169
	Sistemi di forze parallele . . . . .	170
	Momento assiale . . . . .	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
	Equazione del moto. Traiettoria . . . . .	193
	Momento angolare. Energia . . . . .	194
	Grafici dell'energia . . . . .	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
	Calcolo della posizione del centro di massa . . . . .	208
	Centro di massa e forza peso . . . . .	211
7.4	Rotazioni rigide attorno ad un asse fisso in un sistema di riferimento inerziale . . . . .	212

<i>Calcolo del momento angolare. Momento d'inerzia . . . . .</i>	212
<i>Caso in cui <math>\mathbf{L}</math> e <math>\boldsymbol{\omega}</math> sono paralleli . . . . .</i>	214
<i>Caso in cui <math>\mathbf{L}</math> e <math>\boldsymbol{\omega}</math> non sono paralleli . . . . .</i>	214
<i>Esempi sugli effetti del non parallelismo tra <math>\mathbf{L}</math> e <math>\boldsymbol{\omega}</math> . . . . .</i>	215
<i>Calcolo dell'energia cinetica e del lavoro. . . . .</i>	217
7.5 Momento d'inerzia . . . . .	218
7.6 Teorema di Huygens-Steiner . . . . .	222
<i>Teorema di Huygens-Steiner e teorema di König . . . . .</i>	224
7.7 Pendolo composto . . . . .	225
7.8 Moto di puro rotolamento . . . . .	226
<i>Conservazione dell'energia. Attrito volvente . . . . .</i>	228
<i>Tensioni in un filo deviato da una carrucola . . . . .</i>	229
7.9 Impulso angolare. Momento dell'impulso . . . . .	232
7.10 Teorema di Poinsot. Ellissoide d'inerzia . . . . .	235
7.11 Giroscopi . . . . .	238
7.12 Corpo rigido libero . . . . .	240
7.13 Leggi di conservazione nel moto di un corpo rigido . . . . .	241
7.14 Urti tra punti materiali e corpi rigidi o tra corpi rigidi . . . . .	243
7.15 Statica . . . . .	247
7.16 Considerazioni conclusive . . . . .	250
Riepilogo . . . . .	251
Quesiti . . . . .	252
Problemi . . . . .	253
Paradosso idrostatico . . . . .	281
Manometro a U . . . . .	281
Barometro di Torricelli . . . . .	282
Pressione atmosferica e sue variazioni . . . . .	282
9.4 Principio di Archimede . . . . .	283
9.5 Liquido in rotazione . . . . .	284
9.6 Attrito interno. Viscosità. Strato limite. Fluido ideale . . . . .	286
9.7 Moto di un fluido. Regime stazionario. Portata . . . . .	287
9.8 Teorema di Bernoulli . . . . .	289
9.9 Applicazioni del teorema di Bernoulli. Flusso in un tubo a sezione costante . . . . .	290
<i>Tubo di Venturi . . . . .</i>	291
<i>Bruciatore a gas. Aspiratore ad acqua . . . . .</i>	291
<i>Paradosso idrodinamico . . . . .</i>	292
<i>Tubo di Pitot . . . . .</i>	292
<i>Teorema di Torricelli . . . . .</i>	292
9.10 Effetti dinamici. Vortici. Riconsiderazione della legge di Leonardo e del teorema di Bernoulli . . . . .	293
<i>Corrente fluida in un condotto curvo . . . . .</i>	294
<i>Conservazione del momento angolare. Vortici . . . . .</i>	294
9.11 Moto laminare . . . . .	295
9.12 Moto turbolento o vorticoso. Numero di Reynolds . . . . .	295
9.13 Moto in un fluido. Resistenza del mezzo . . . . .	296
9.14 Effetto Magnus. Portanza . . . . .	297
9.15 Fenomeni di superficie . . . . .	298
9.16 Forze di coesione e adesione. Fenomeni di capillarità . . . . .	301
Riepilogo . . . . .	303
Quesiti . . . . .	304
Problemi . . . . .	304

**CAPITOLO 8****Proprietà elastiche dei solidi**

8.1 Trazione e compressione . . . . .	261
<i>Legge di Poisson . . . . .</i>	264
8.2 Deformazione plastica. Rottura. Isteresi elastica . . . . .	265
8.3 Scorrimento . . . . .	266
8.4 Torsione. Pendolo e bilancia di torsione . . . . .	267
<i>Pendolo di torsione . . . . .</i>	268
<i>Bilancia di torsione. Esperimento di Cavendish . . . . .</i>	269
8.5 Pressione. Compressione uniforme . . . . .	270
8.6 Durezza . . . . .	271
Riepilogo . . . . .	272
Quesiti . . . . .	273
Problemi . . . . .	273

**CAPITOLO 9****Proprietà meccaniche dei fluidi**

9.1 Pressione . . . . .	275
<i>Lavoro delle pressioni . . . . .</i>	277
9.2 Equilibrio statico di un fluido . . . . .	278
9.3 Equilibrio in presenza della forza peso . . . . .	279
<i>Vasi comunicanti . . . . .</i>	281

**CAPITOLO 10****Onde meccaniche**

10.1 Equazione differenziale delle onde piane . . . . .	308
<i>Sovrapposizione di onde . . . . .</i>	310
10.2 Onde elastiche in una sbarra solida . . . . .	310
10.3 Onde in una corda tesa . . . . .	312
10.4 Proprietà elastiche dei gas. Onde nei gas . . . . .	313
<i>Proprietà elastiche dei gas . . . . .</i>	314
<i>Propagazione di onde in un gas . . . . .</i>	314
10.5 Onde piane armoniche . . . . .	317
10.6 Analisi di Fourier . . . . .	318
10.7 Polarizzazione delle onde . . . . .	319
10.8 Onde sulla superficie di un liquido . . . . .	322
10.9 Propagazione dell'energia. Intensità di un'onda . . . . .	324

10.10	Intensità delle onde sonore. Fonometria . . . . .	327
	<i>Caratteristiche fisiche dell'orecchio umano. Fonometria . . . . .</i>	328
	<i>Ultrasuoni . . . . .</i>	330
10.11	Onde in più dimensioni . . . . .	331
	<i>Onde elastiche in una membrana tesa . . . . .</i>	332
	<i>Onde sferiche e circolari . . . . .</i>	333
	<i>Onde cilindriche . . . . .</i>	334
10.12	Assorbimento dell'energia nei mezzi . . . . .	335
10.13	Pacchetti d'onde . . . . .	336
	<i>Descrizione matematica di un pacchetto di onde . . . . .</i>	337
10.14	Velocità di fase e velocità di gruppo . . . . .	338
10.15	Effetto Doppler . . . . .	341
10.16	Onda d'urto . . . . .	343
10.17	Onde stazionarie in una corda tesa . . . . .	344
	<i>Corda tesa con entrambi gli estremi fissi . . . . .</i>	345
	<i>Corda tesa con un estremo libero . . . . .</i>	347
10.18	Onde stazionarie in una colonna di gas . . . . .	349
	Riepilogo . . . . .	351
	Quesiti . . . . .	353
	Problemi . . . . .	353

## CAPITOLO 11

### Elementi di relatività ristretta

11.1	Relatività delle misure di tempo e lunghezza . . . . .	356
	<i>Crisi della simultaneità . . . . .</i>	356
	<i>Dilatazione dei tempi . . . . .</i>	356
	<i>Contrazione delle lunghezze . . . . .</i>	357
11.2	Trasformazioni di Lorentz . . . . .	358
	<i>Trasformazione delle velocità . . . . .</i>	360
	<i>Trasformazione delle accelerazioni . . . . .</i>	362
	<i>Contrazione delle lunghezze e dilatazione dei tempi . . . . .</i>	363
11.3	Quantità di moto ed energia relativistiche . . . . .	364
	<i>Trasformazione di Lorentz per quantità di moto ed energia . . . . .</i>	367
	<i>Forza . . . . .</i>	369
11.4	Energia e massa . . . . .	371
11.5	Urti relativistici . . . . .	373
11.6	Considerazioni conclusive . . . . .	374
	Riepilogo . . . . .	375
	Quesiti . . . . .	376
	Problemi . . . . .	376

## CAPITOLO 12

### Elementi di meccanica analitica e di meccanica quantistica

12.1	Meccanica analitica . . . . .	378
12.2	Formalismo lagrangiano . . . . .	378
12.3	Formalismo hamiltoniano . . . . .	382

12.4	Meccanica quantistica . . . . .	385
12.5	Funzioni d'onda. Equazione di Schrödinger . . . . .	385
12.6	Osservabili fisiche ed operatori. Relazioni di commutazione. Principio di indeterminazione . . . . .	392
12.7	Considerazioni conclusive . . . . .	397
	Riepilogo . . . . .	398
	Quesiti . . . . .	399
	Problemi . . . . .	400

## CAPITOLO 13

### Primo principio della termodinamica

13.1	Sistemi e stati termodinamici . . . . .	401
13.2	Equilibrio termodinamico. Principio dell'equilibrio termico . . . . .	403
13.3	Definizione di temperatura. Termometri . . . . .	404
	<i>Scale termometriche . . . . .</i>	406
13.4	Sistemi adiabatici. Esperimenti di Joule. Calore . . . . .	406
13.5	Primo principio della termodinamica. Energia interna . . . . .	408
	<i>Convenzione sui segni di calore e lavoro . . . . .</i>	410
13.6	Trasformazioni termodinamiche. Lavoro e calore . . . . .	410
	<i>Trasformazioni adiabatiche . . . . .</i>	411
	<i>Trasformazioni reversibili e irreversibili . . . . .</i>	411
13.7	Calorimetria . . . . .	413
	<i>Misura dei calori specifici . . . . .</i>	416
	<i>Calori specifici dei solidi . . . . .</i>	417
	<i>Sorgenti di calore . . . . .</i>	418
13.8	Processi isotermi. Cambiamenti di fase . . . . .	418
13.9	Trasmissione del calore . . . . .	420
	<i>Conduzione di calore . . . . .</i>	420
	<i>Convezione del calore . . . . .</i>	422
	<i>Irraggiamento . . . . .</i>	423
	<i>Parete adiabatica. Vaso Dewar . . . . .</i>	423
	<i>Passaggio di calore da un solido a un fluido . . . . .</i>	423
13.10	Dilatazione termica di solidi e liquidi . . . . .	424
13.11	Considerazioni conclusive . . . . .	426
	Riepilogo . . . . .	426
	Quesiti . . . . .	427
	Problemi . . . . .	428

## CAPITOLO 14

### Gas ideali e reali

14.1	Leggi dei gas. Equazione di stato del gas ideale . . . . .	429
	<i>Legge isoterma di Boyle . . . . .</i>	430
	<i>Legge isobara di Volta-Gay Lussac . . . . .</i>	430
	<i>Legge isocora di Volta-Gay Lussac . . . . .</i>	431

<i>Legge di Avogadro</i> .....	431	<i>Enunciati del secondo principio</i> .....	482
<i>Equazione di stato del gas ideale</i> .....	432	<i>Equivalenza degli enunciati del secondo principio</i> ..	482
14.2 Termometro a gas ideale a volume costante ..	434	<i>Ciclo monotermo</i> .....	483
14.3 Trasformazioni di un gas. Lavoro.....	436	15.2 Reversibilità e irreversibilità .....	483
14.4 Calore. Calori specifici .....	438	15.3 Teorema di Carnot .....	484
14.5 Energia interna del gas ideale .....	439	<i>Studio del rendimento massimo</i> .....	486
<i>Relazione di Mayer</i> .....	440	<i>Diagramma di Raveau</i> .....	487
14.6 Studio di alcune trasformazioni di gas ideali..	442	15.4 Temperatura termodinamica assoluta .....	488
<i>Trasformazioni adiabatiche</i> .....	442	<i>Zero assoluto</i> .....	489
<i>Trasformazioni isoterme</i> .....	445	15.5 Teorema di Clausius .....	490
<i>Trasformazioni isocore</i> .....	446	15.6 La funzione di stato entropia .....	492
<i>Trasformazioni isobare</i> .....	446	<i>Diagrammi TS</i> .....	493
<i>Entalpia</i> .....	447	15.7 Princípio di aumento dell'entropia .....	495
<i>Trasformazioni generiche</i> .....	447	15.8 Calcoli di variazioni di entropia .....	496
14.7 Trasformazioni cicliche. Cicli termici e cicli frigoriferi .....	448	<i>Trasformazioni adiabatiche</i> .....	496
<i>Cicli termici. Rendimento</i> .....	449	<i>Scambi di calore con sorgenti</i> .....	497
<i>Ciclo di Carnot</i> .....	449	<i>Scambi di calore tra due corpi</i> .....	499
<i>Ciclo di Stirling</i> .....	451	<i>Cambiamenti di fase</i> .....	500
<i>Ciclo Otto (motore a scoppio)</i> .....	452	<i>Riscaldamento per attrito</i> .....	500
<i>Ciclo Diesel</i> .....	453	15.9 Entropia del gas ideale .....	501
<i>Note conclusive sui cicli termici</i> .....	454	<i>Trasformazioni adiabatiche</i> .....	502
<i>Cicli frigoriferi. Efficienza</i> .....	454	15.10 Energia inutilizzabile .....	504
14.8 Gas reali. Equazione di stato. Energia interna..	455	<i>Pompa di calore</i> .....	506
<i>Equazione di stato di un gas reale</i> .....	456	15.11 Entropia e probabilità .....	506
<i>Energia interna</i> .....	456	15.12 Cenni sul terzo principio della termodinamica .....	510
<i>Espansione di Joule-Thomson</i> .....	457	15.13 Considerazioni conclusive .....	511
14.9 Diagrammi <i>pV</i> e <i>pT</i> , equazione di van der Waals, formula di Clapeyron .....	457	<i>Riepilogo</i> .....	512
<i>Equazione di van der Waals</i> .....	460	<i>Quesiti</i> .....	513
<i>Cicli frigoriferi reali</i> .....	461	<i>Problemi</i> .....	513
<i>Diagrammi pT</i> .....	461		
<i>Formula di Clapeyron</i> .....	462		
14.10 Teoria cinetica dei gas ideali .....	464		
<i>Calcolo della pressione</i> .....	464		
<i>Equipartizione dell'energia</i> .....	466		
<i>Legge di Dalton</i> .....	468		
<i>Distribuzione delle velocità</i> .....	469		
<i>Cammino libero medio. Viscosità</i> .....	471		
14.11 Cenni di teoria cinetica dei gas reali .....	472		
14.12 Considerazioni conclusive .....	474		
<i>Riepilogo</i> .....	474		
<i>Quesiti</i> .....	476		
<i>Problemi</i> .....	477		

**CAPITOLO 15****Secondo principio della termodinamica**

15.1 Secondo principio della termodinamica.....	481
---	-----

**CAPITOLO 16****Sistemi pVT. Potenziali termodinamici**

16.1 Potenziali termodinamici .....	523
<i>Entalpia libera o potenziale di Gibbs</i> .....	523
<i>Energia libera o potenziale di Helmholtz</i> .....	524
<i>Entalpia</i> .....	524
<i>Entalpia e reazioni chimiche</i> .....	526
16.2 Proprietà generali dei sistemi <i>pVT</i> .....	528
16.3 Relazioni di Maxwell .....	533
16.4 Espansione di Joule-Thomson .....	539
16.5 Miscele di gas ideali .....	541
16.6 Sistemi aperti. Potenziale chimico. Regola delle fasi .....	544
<i>Regola delle fasi</i> .....	546
<i>Riepilogo</i> .....	548
<i>Quesiti</i> .....	548
<i>Problemi</i> .....	549

**APPENDICE A****Richiami matematici**

A.1 Chiarimento sui simboli . . . . .	A.551
A.2 Sviluppi in serie . . . . .	A.551
A.3 Funzioni di più variabili. Derivate parziali . . .	A.552
A.4 Calcoli di integrali di superficie e di volume .	A.553
A.5 Equazioni differenziali . . . . .	A.554

**APPENDICE B****Unità di misura**

B.1 Grandezze fisiche e loro unità di misura . . . . .	B.557
B.2 Sistema Internazionale . . . . .	B.558
B.3 Grandezze meccaniche e termodinamiche . . .	B.560
B.4 Questioni dimensionali . . . . .	B.561

**APPENDICE C****Calcolo vettoriale**

C.1 Grandezze scalari e vettoriali . . . . .	C.563
C.2 Prime proprietà dei vettori . . . . .	C.564

*Regola di somma* . . . . . C.564

*Scomposizione di un vettore* . . . . . C.565

*Proprietà di invarianza* . . . . . C.565

C.3 Prodotti tra vettori . . . . . C.567

*Prodotto scalare* . . . . . C.567

*Prodotto vettoriale* . . . . . C.568

*Momento di un vettore rispetto ad un punto* . . . . . C.569

C.4 Derivata di un vettore . . . . . C.569

*Derivata rispetto al tempo di un versore  $u(t)$*  . . . . . C.570

*Scrittura intrinseca della derivata di un vettore* . . . . . C.570

C.5 Integrazione vettoriale . . . . . C.571

*Integrale di linea* . . . . . C.571

C.6 Gradiente di una funzione scalare . . . . . C.572

**APPENDICE D****Guida alla risoluzione dei problemi. Risultati numerici** . . . . . D.575

**Indice analitico** . . . . . I.615

# PREMESSA allo studio della meccanica e della termodinamica

La Fisica Classica fa parte del curriculum universitario di tutte le discipline scientifiche. Il motivo risiede nel fatto che il metodo di indagine fisica, iniziato principalmente da Galileo Galilei circa 400 anni fa, ha portato alla formulazione di una serie di leggi le quali forniscono la spiegazione dei principali fenomeni naturali e ne permettono l'applicazione. Lo studio della Fisica Classica ha quindi un importante carattere culturale, sia sotto l'aspetto strettamente propedeutico (si apprendono nozioni di base che poi opportunamente sviluppate si adattano ad altre discipline) sia perché presenta una metodologia generale di indagine e di rappresentazione dei fenomeni naturali.

Tradizionalmente gli argomenti di Fisica Classica vengono raggruppati secondo un determinato ordine. Si inizia con la Meccanica, che tratta il moto dei corpi in generale e poi in svariate situazioni particolari, come ad esempio quella dei corpi sottoposti all'interazione gravitazionale. Si passa poi alla Termodinamica, che studia i fenomeni termici, tra i quali le trasformazioni di calore in lavoro rivestono notevole importanza applicativa. Segue l'Elettromagnetismo che si occupa dei fenomeni dovuti all'esistenza in natura delle cariche elettriche.

Tale suddivisione, che è seguita anche nei due volumi di quest'opera, non deve essere intesa in modo rigido, in quanto numerosi fenomeni vengono illustrati ricorrendo a nozioni sviluppate nelle varie parti: ci sono cioè concetti e metodi che ricorrono lungo l'esposizione. Ad esempio, il moto di una particella carica in un campo elettrico e magnetico avviene sotto l'azione di forze che si studiano in elettromagnetismo. Tuttavia, l'accelerazione, la velocità e la traiettoria si calcolano seguendo quanto imparato nello studio della meccanica.

Le leggi della Fisica Classica si applicano a fenomeni macroscopici, come sono il moto di un satellite intorno alla Terra, il funzionamento di una macchina termica, la produzione di un campo magnetico da parte di correnti che passano in fili conduttori, la scomposizione di un fascio di luce bianca nei vari colori tramite un prisma. Esse invece falliscono quando si tenta di applicarle direttamente a fenomeni che si svolgono a livello molecolare, atomico o nucleare ovvero, come si dice, a fenomeni microscopici. L'approccio corretto per la trattazione di tali fenomeni si è sviluppato nella prima metà del 1900 con la formulazione della Meccanica Quantistica. Nel presente volume vengono introdotti i concetti base della Meccanica Quantistica mentre nel secondo volume accenneremo ad alcuni dei problemi incontrati nell'estensione di concetti macroscopici al mondo microscopico e alle soluzioni trovate in ambito quantistico. Molto spesso si usa il termine Fisica Classica per individuare gli argomenti relativi a fenomeni macroscopici e si riserva il termine Fisica Moderna all'insieme di argomenti riguardanti le proprietà degli atomi, delle molecole e dei loro costituenti. Da questo punto di vista, il capitolo dedicato alla Meccanica Quantistica nel presente volume è inteso come raccordo tra i corsi di base in Fisica Classica e quelli specialistici di Fisica Moderna.

Il nostro studio inizia dunque con la meccanica. Storicamente questo è stato il primo argomento della Fisica Classica ad essere sistemato concettualmente, soprattutto per opera di Newton (1642-1727). Egli pose le basi della comprensione delle leggi del moto dei corpi e scoprì l'espressione della forza gravitazionale, cioè della forza che si esercita tra corpi dotati di massa e che, ad esempio, regola il moto dei pianeti nel sistema solare.

La logica del cammino attraverso la meccanica verrà spiegata nei paragrafi introduttivi dei dodici capitoli che seguono. Vogliamo qui richiamare l'attenzione su un aspetto delle leggi fondamentali che incontreremo. Anche se possono apparire

come relazioni algebriche, esse in realtà esprimono delle condizioni sulle variazioni di certe grandezze fisiche e quindi sono leggi che indicano come si evolve il fenomeno da esse descritto. Queste affermazioni risulteranno chiare dopo le prime applicazioni; le facciamo ora per mettere in evidenza il legame della formulazione fisica con l'Analisi Matematica, che in effetti costituisce il linguaggio formale della Fisica.

Nel presente volume, il cammino prosegue con lo studio della Termodinamica, a cui sono dedicati i successivi quattro capitoli.

Noi diamo per scontate le nozioni di base dell'Analisi Matematica relative alle operazioni di derivazione e di integrazione. Un richiamo è fatto nell'appendice A, in cui si anticipa anche qualche nozione sulle equazioni differenziali. Un altro argomento essenziale per i nostri sviluppi, e cioè il calcolo vettoriale, è richiamato nell'appendice C. Riteniamo che lo studente debba leggere attentamente tali due appendici già mentre segue il primo capitolo e rivederle successivamente per rendere più sicuro l'apprendimento.

Altre nozioni più elementari frequentemente usate sono quelle di funzione trigonometrica (seno, coseno, tangente), di logaritmo (quasi sempre naturale, cioè in base  $e$ ) e di funzione esponenziale ( $e^x$ ). Oltre alla conoscenze su questi argomenti sarà bene rivedere quelle sui calcoli algebrici più semplici e richiamare le prime nozioni di geometria analitica (coordinate cartesiane, la retta come relazione lineare tra  $x$  e  $y$ , la parabola come relazione quadratica e così via).

Un'altra anticipazione molto importante è questa: le leggi fisiche sono relazioni quantitative tra grandezze. Esse sono ricavate direttamente o indirettamente da esperimenti che riproducono in laboratorio i vari fenomeni oggetto di indagine. La misura delle grandezze fisiche è pertanto un aspetto fondamentale della sperimentazione e della tecnologia che ne segue; essa comporta da una parte la definizione di unità di misura e di campioni delle stesse, dall'altra la precisazione delle metodologie seguite. Si tratta di un problema complesso e in continua evoluzione, soprattutto dopo la presa d'atto della possibilità di riferirsi a fenomeni atomici per la determinazione dei campioni e delle opportunità offerte dalle moderne tecnologie elettroniche. Il quadro del sistema di unità di misura attualmente in vigore è presentato nell'appendice B; anche questa va letta in parallelo allo studio dei primi due capitoli e rivista accuratamente alla fine del secondo.

Per quanto riguarda gli esempi e i problemi non risolti, questi sono intesi come applicazioni immediate delle nozioni esposte e sono spesso quantitativi. Conviene considerarli parte integrante del testo e meditare sul loro svolgimento, sia concettuale (uso delle leggi) che numerico (uso delle unità di misura). I problemi non risolti subito sono raggruppati alla fine di ogni capitolo. Si tenga presente che la loro soluzione spesso richiede l'uso di nozioni distribuite anche nei capitoli precedenti. Un cenno allo svolgimento e i risultati numerici sono dati alla fine. Lo studio degli esempi facilita di norma la soluzione dei problemi.

# Cinematica del punto materiale

capitolo

1

La meccanica riguarda lo studio del moto dei corpi materiali. Essa spiega le relazioni che esistono tra le cause che generano il moto e le caratteristiche di questo e le esprime con leggi quantitative.

Se un corpo è esteso, come lo sono tutti i corpi materiali, il moto può risultare notevolmente complicato. Per questa ragione, seguendo un processo molto comune in fisica, iniziamo lo studio del moto dal più semplice corpo, quello puntiforme, detto **punto materiale** o spesso anche **particella**. Si tratta di

un corpo privo di dimensioni ovvero che presenti dimensioni trascurabili rispetto a quelle dello spazio in cui può muoversi o degli altri corpi con cui può interagire.

L'introduzione di tale concetto rende innanzitutto più semplice la trattazione di alcuni problemi. Per esempio, se siamo interessati a studiare il moto della Terra intorno al Sole, possiamo considerare in prima approssimazione sia la Terra che il Sole come punti materiali, dato che le loro dimensioni sono trascurabili rispetto alla loro distanza; se invece si vuole studiare la rotazione di un corpo celeste (per esempio della Terra), si dovrà necessariamente tener conto della sua forma e dimensione. Come altro esempio, consideriamo una navicella spaziale; ai fini della determinazione della sua posizione durante il volo nello spazio la si può certamente considerare come un punto materiale, mentre per descriverne l'attracco con un'altra navicella la si deve necessariamente descrivere come un corpo esteso.

Lo studio del sistema punto materiale permette inoltre di definire nel modo più facile alcune grandezze meccaniche fondamentali e di apprezzarne l'importanza ed il significato con immediatezza, in assenza delle complicazioni che deriverebbero dalla struttura estesa del corpo.

L'analisi completa del moto di un corpo riguarda sia il collegamento del moto stesso alle interazioni con i corpi circostanti, studiata dalla **dinamica**, che la descrizione geometrica dell'evoluzione temporale del fenomeno di movimento. Questa parte della meccanica, descrittiva del moto di un corpo, indipendentemente dalle cause che lo determinano, viene detta **cinematica**.

D'altra parte, un corpo esteso solo eccezionalmente si muove come un punto materiale (si parla in tal caso di traslazione, come vedremo in seguito); esso può compiere contemporaneamente altri tipi di moto, come rotazioni (ad esempio l'asse di un motore) o vibrazioni (ad esempio il solaio di un edificio). Occorrerà quindi estendere i risultati a tali casi.

Cominceremo il nostro studio della meccanica dalla cinematica del punto, trattata qui nel capitolo 1, e lo proseguiremo nel capitolo 2 con la dinamica del punto. Nei capitoli successivi estenderemo la trattazione alla dinamica dei sistemi di punti materiali, che applicheremo a casi molto diversi tra loro, come i corpi solidi e i fluidi. Capiremo allora l'utilità dello studio preliminare condotto approssimando tali sistemi a singoli punti materiali.

Punto materiale

Dinamica

Cinematica

## 1.1 Legge oraria e traiettoria

Il moto di un punto materiale è determinato se ne è nota la **legge oraria**, che ne descrive la **posizione** in funzione del **tempo**  $t$  rispetto a un determinato sistema di riferimento. Scegliendo, ad esempio, un **sistema di riferimento spaziale** cartesiano

Sistema di riferimento,  
posizione, legge oraria

$Oxyz$  (figura 1.1) ed un **riferimento temporale**, il moto è determinato se sono note le **coordinate**  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  in funzione di  $t$ . La scelta di un sistema cartesiano, anche se è la più comune, non è unica; in determinate situazioni fisiche possono essere più idonei altri sistemi di riferimento, come quelli basati su coordinate polari o cilindriche.

La **traiettoria** è il luogo delle posizioni occupate successivamente dal punto in movimento e costituisce una curva continua nello spazio. Lo studio delle variazioni di posizione lungo la traiettoria nel tempo porterà a definire il concetto di velocità, mentre lo studio delle variazioni della velocità con il tempo introdurrà la grandezza accelerazione.

Le grandezze di maggior interesse in cinematica sono lo **spazio**, la **velocità**, l'**accelerazione** e il **tempo**; quest'ultimo molto spesso viene scelto come grandezza indipendente, in funzione di cui si esprimono le altre.

La **quiete** è un particolare tipo di moto in cui le coordinate restano costanti nel tempo e quindi velocità e accelerazione sono nulle.

Dobbiamo però sottolineare che la traiettoria di un punto materiale in moto può avere una forma diversa ed essere rappresentata da un'equazione diversa in diversi sistemi di riferimento. Osserviamo, ad esempio, come un punto in quiete in un sistema di riferimento possa apparire in moto rispetto ad un altro. Pensiamo al volo di un uccello visto da una persona ferma o da un'altra persona in un'auto-vettura in movimento. Dunque, è necessario specificare sempre il sistema di riferimento rispetto a cui si osserva il moto. Nel capitolo 3, dopo aver trattato la dinamica del punto, ci occuperemo del problema del moto relativo, cioè delle relazioni che esistono tra le descrizioni di uno stesso moto visto da due sistemi di riferimento in movimento l'uno rispetto all'altro.

Nei paragrafi che seguono svilupperemo i concetti di velocità e accelerazione, considerando in generale le funzioni  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  continue e derivabili.

## Unità di misura

Quando si introduce una nuova grandezza fisica bisogna sempre precisare come si misura e in che unità è espresso il risultato numerico della misura. Trattiamo questo argomento nell'Appendice B, che consigliamo di leggere subito per fissare le idee sulle grandezze assunte come fondamentali e sulla nozione di dimensioni di una grandezza fisica; essa servirà poi come quadro riassuntivo delle unità delle varie grandezze, che definiremo di volta in volta nel testo.

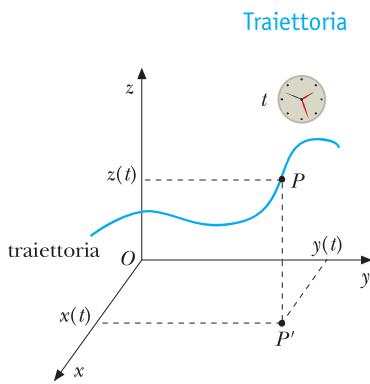
Il moto di un punto è espresso dalla conoscenza della posizione (che ha la dimensione di una **lunghezza**) nel **tempo** e queste due grandezze si misurano, nel **Sistema Internazionale delle unità di misura (S.I.)**, in **metri (m)** e in **secondi (s)** rispettivamente.

Osserviamo che lunghezza e tempo sono le due sole grandezze fondamentali che intervengono in cinematica.

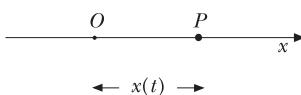
## 1.2 Moto rettilineo

Il primo moto che prendiamo in considerazione, iniziando dal caso più semplice, è quello rettilineo. Esso si svolge lungo una retta sulla quale vengono fissati arbitrariamente un'origine e un verso; il moto del punto è descrivibile tramite una sola coordinata, funzione del tempo,  $x(t)$ . La geometria del moto rettilineo è rappresentata in figura 1.2. Anche la scelta dell'origine dei tempi è arbitraria;  $t = 0$  può coincidere con l'inizio dell'osservazione ma ciò non è assolutamente necessario.

Eperimentalmente  $x(t)$  può essere determinata rilevando in una serie di istanti successivi  $t_i$  la posizione del punto materiale, ad esempio mediante un sistema di telemetria a microonde, un dispositivo di localizzazione satellitare o mediante l'acquisizione di immagini ad una data frequenza di ripetizione. Con tali sistemi si possono ottenere coppie di valori  $t_i$ ,  $x_i$  (ad esempio le tabelle nelle figure 1.3, 1.4, 1.5) e ricercare una relazione tra  $x$  e  $t$ , cioè la funzione  $x(t)$ .



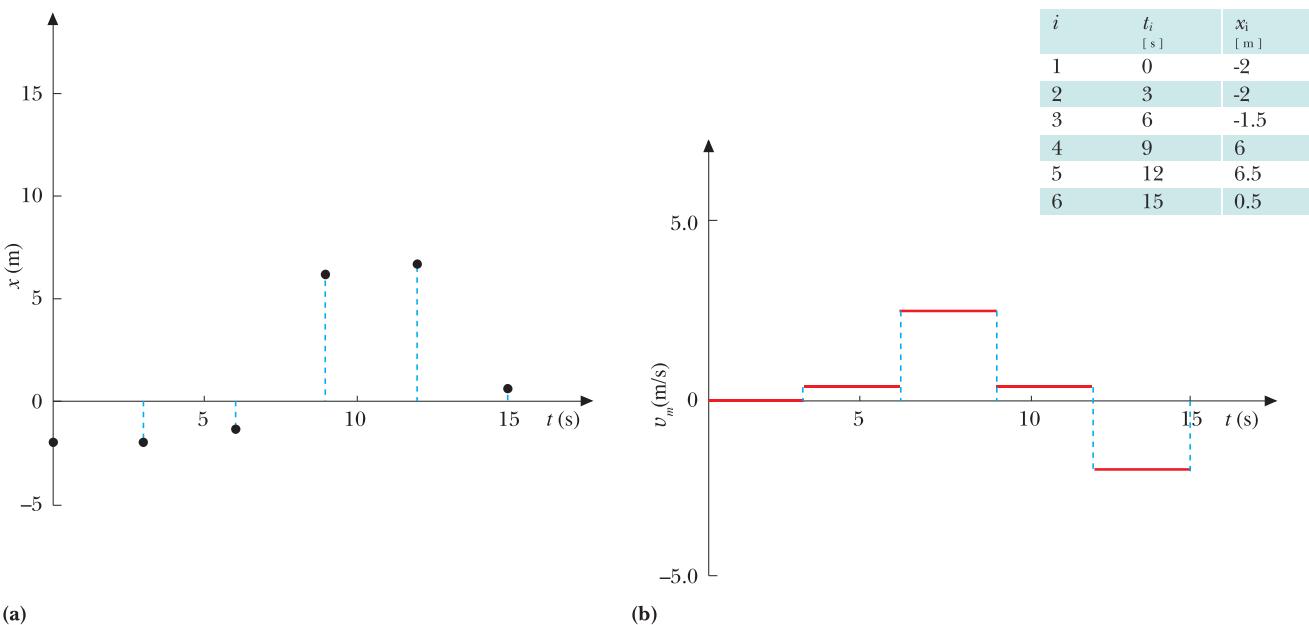
**Figura 1.1** Traiettoria di un punto nello spazio.



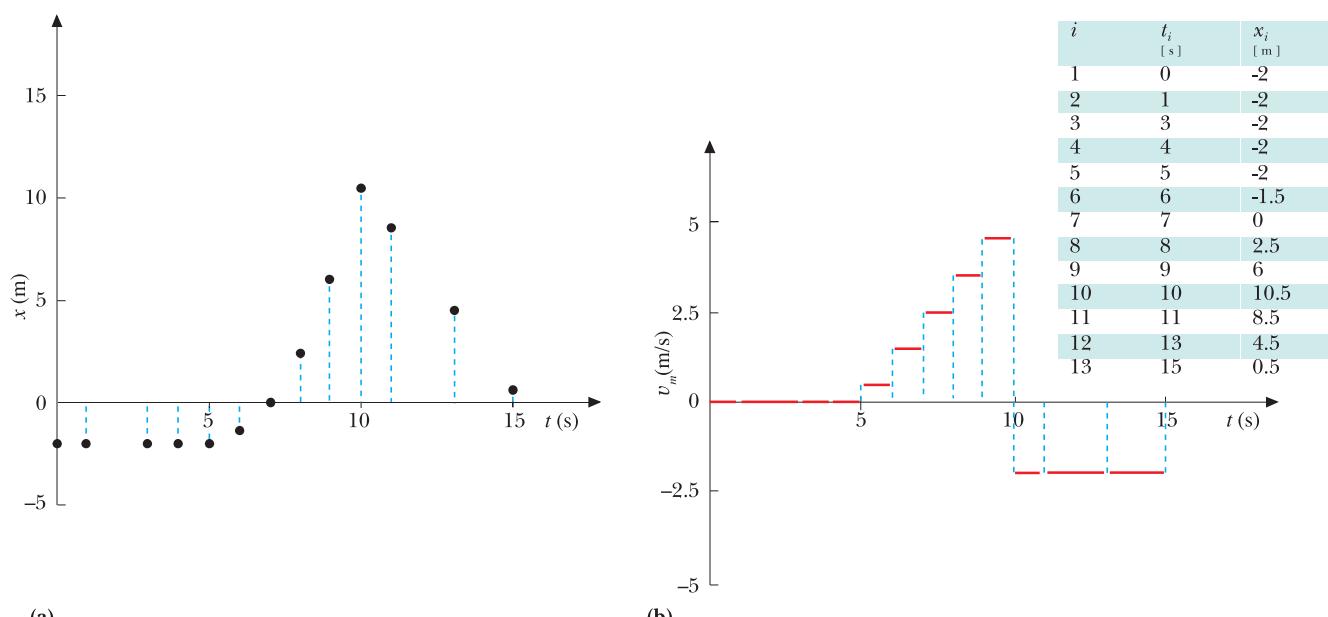
**Figura 1.2** Moto rettilineo e sistema di riferimento  $Ox$ .

Le misure ottenute possono essere rappresentate in un piano cartesiano, riportando sull'asse delle ascisse i valori del tempo  $t_i$  e su quello delle ordinate i corrispondenti valori della posizione  $x_i$ . La figura che si ottiene viene chiamata **diagramma orario**. È necessario ovviamente introdurre delle unità di riferimento nei due assi, ad esempio la lunghezza corrispondente ad un intervallo di tempo di un secondo nelle ascisse e quella relativa ad uno spostamento di un metro nelle ordinate. A titolo di esempio, nelle figure 1.3a, 1.4a, 1.5a, sono riportate le misure e i diagrammi orari corrispondenti allo stesso moto di un punto materiale, campionato ad intervalli di tempo di durata sempre più piccola. Notiamo che la spazialità dei tempi di misura non necessariamente deve essere costante.

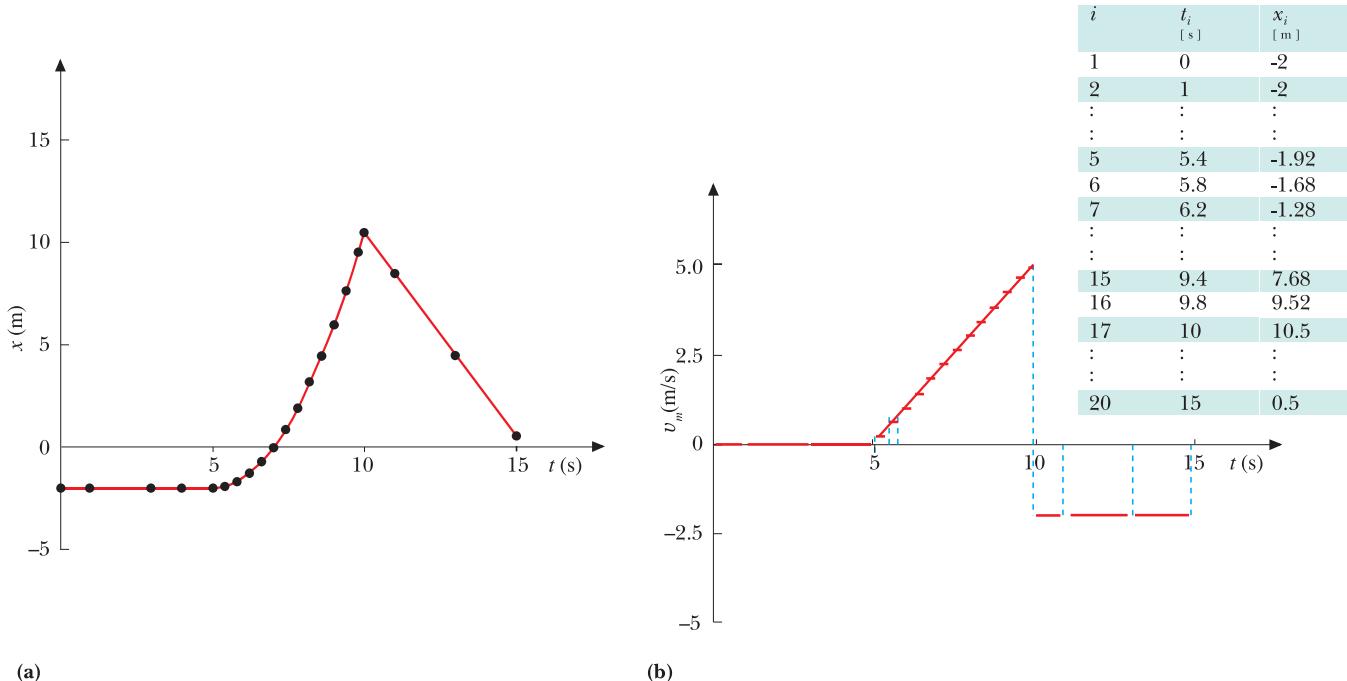
### Diagramma orario



**Figura 1.3** (a) Valori di posizione  $x$  misurati a diversi istanti di tempo  $t$ . (b) Andamento della velocità media in tutti gli intervalli di tempo successivi.



**Figura 1.4** (a) Valori di  $x$  misurati a intervalli di tempo più brevi. Si delinea un andamento per la  $x(t)$ . (b) Andamento della velocità media; l'andamento può essere molto diverso da quello della figura 1.3.



(a)

(b)

**Figura 1.5** (a) Valori di  $x$  misurati a intervalli di tempo ancora più brevi. Tra  $t = 0$  s e  $t = 5$  s il punto rimane fermo in  $x = -2$  m. Tra  $t = 5$  s e  $t = 10$  s il punto si muove nel verso positivo dell'asse  $x$  con una relazione quadratica tra  $x$  e  $t$  del tipo  $x = a + b(t - t')^2$ , in cui  $a = -2$  m,  $b = 0.5 \text{ ms}^{-2}$ ,  $t' = 5$  s. Tra  $t = 10$  s e  $t = 15$  s il punto si muove nel verso negativo dell'asse  $x$  ( $x$  diminuisce) con una relazione lineare tra  $x$  e  $t$  del tipo  $x = c + d(t - t'')$ , in cui  $c = 10.5$  m,  $d = -2 \text{ ms}^{-1}$ ,  $t'' = 10$  s. (b) Andamento della velocità media. Tra  $t = 0$  s e  $t = 5$  s si ha  $v_m = 0 \text{ ms}^{-1}$ . Tra  $t = 5$  s e  $t = 10$  s l'andamento costante a tratti di  $v_m$  approssima la relazione lineare ottenuta derivando rispetto al tempo la funzione che descrive  $x(t)$  nello stesso intervallo temporale, ossia la velocità istantanea, che è data da  $v = 2b(t - t')$ . Tra  $t = 10$  s e  $t = 15$  s si ha  $v_m = -2 \text{ ms}^{-1}$ , corrispondente alla derivata prima dell'espressione di  $x(t)$  nello stesso intervallo di tempo. Gli andamenti analitici di  $x(t)$  e  $v(t) = dx/dt$  sono graficati in rosso.

Osserviamo che in una misura fisica reale ciascun dato è affetto da **errori sperimentali** e pertanto i punti che rappresentano le varie misure non si dispongono esattamente su una retta, una parabola o su altri tipi di curve. L'espressione di  $x(t)$  è ottenibile solo tramite opportuni metodi di ottimizzazione analitica.

### 1.3 Velocità nel moto rettilineo

#### Velocità media

Introduciamo ora il concetto di velocità media e velocità istantanea nel moto rettilineo. Se al tempo  $t = t_p$  il punto si trova nella posizione  $x = x_p$  e al tempo  $t = t_q$  nella posizione  $x = x_q$ ,  $\Delta x = x_q - x_p$  rappresenta lo spazio percorso nell'intervallo di tempo  $\Delta t = t_q - t_p$ . Possiamo caratterizzare la rapidità con cui avviene lo spostamento tra  $x_p$  e  $x_q$  tramite la **velocità media**, data dal rapporto fra lo spazio percorso e l'intervallo di tempo trascorso

$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_q - x_p}{t_q - t_p} .$$

Nelle figure 1.3b, 1.4b e 1.5b grafichiamo i valori delle velocità medie ricavate dalle rispettive tabelle e diagrammi orari, nei generici  $\Delta t$ . L'andamento dei grafici è rappresentato da una funzione costante a tratti. Se l'intervallo di campionamento temporale è grande, come ad esempio in figura 1.3, la velocità media fornisce una informazione complessiva ma, come si chiarirà meglio nel seguito, non dà quasi nessuna indicazione sulle caratteristiche effettive del moto.

L'osservazione delle figure 1.4 e 1.5 mostra che diminuire l'ampiezza degli intervalli di tempo permette di individuare sempre meglio la funzione  $x(t)$  e le sue

# Elementi di meccanica analitica e di meccanica quantistica

capitolo

12

Nei capitoli precedenti abbiamo presentato i principi fondamentali della meccanica newtoniana e, tramite numerosi esempi, ne abbiamo illustrato potenzialità e applicazioni. La meccanica newtoniana costituisce il fondamento del dominio più ampio della **meccanica classica**, che è stata sviluppata dopo Newton e fino al ventesimo secolo. Quest'ultima è un pilastro fondamentale della cultura fisica e fornisce la base operativa per innumerevoli applicazioni tecnologiche. Ricordiamo che il successo della meccanica classica è dovuto innanzitutto alla capacità di rendere conto in una cornice unitaria di osservazioni sperimentali (misure) relative a fenomeni a prima vista diversi (si pensi alla gravitazione che spiega la “caduta della mela” e il moto della Luna). Essa ha inoltre consentito di predire fenomeni o fatti non ancora osservati: per esempio, motivò la ricerca del pianeta Nettuno, la cui posizione era stata predetta dai fisici matematici, poi effettivamente scoperto dagli astronomi nel 1846. Ogni branca dell’ingegneria, della chimica e della biologia utilizza la meccanica classica per la spiegazione di processi naturali o per la realizzazione di dispositivi e prodotti.

Verso la fine del diciannovesimo secolo, a seguito dello sviluppo degli studi sull’**elettromagnetismo** e del notevolissimo miglioramento delle prestazioni degli strumenti scientifici, apparve però evidente che alcuni fenomeni relativi al mondo microscopico (molecole, atomi, particelle, che venivano allora scoperte o caratterizzate) non potevano essere descritte utilizzando la meccanica classica, fondata sulle leggi di Newton.

Tali limitazioni sono state sostanzialmente superate con lo sviluppo della **meccanica quantistica**, e poi dell’elettrodinamica e della cromodinamica quantistica, che trattano sistemi microscopici. Alcuni risultati di tale teoria, che vengono generalmente inquadrati nella **fisica moderna** e di cui daremo esempi in questo capitolo, possono apparire sorprendenti o contro-intuitivi. Ciò non deve però stupire: le nostre intuizioni sono relative alle misure effettuate con i nostri sensi, che non sono in grado di “vedere” il mondo microscopico (il potere risolutivo dell’occhio umano è dell’ordine di un decimo di millimetro, il diametro di un cappello, un milione di volte maggiore della dimensione di un atomo).

Notiamo che l’impiego della fisica moderna è indispensabile per comprendere non solo il mondo subatomico o i processi cosmologici, ma anche dispositivi e processi di enorme diffusione e alla base del moderno sviluppo tecnologico, in particolare, ma non solo, delle tecnologie dell’informazione e comunicazione. Ci riferiamo qui alla tecnologia dei semiconduttori, e quindi ai computer e tutti i moderni dispositivi di comunicazione, ai laser, a molti sistemi di sensoristica, ai sistemi di posizionamento satellitare, a molte sorgenti di radiazione elettromagnetica e di particelle veloci.

In questo capitolo intendiamo solo introdurre brevemente i principi fondamentali della meccanica quantistica e illustrarne alcune applicazioni semplici particolarmente importanti. Trattazioni più approfondite, e che spesso richiedono un bagaglio matematico che supera le conoscenze fornite dai corsi del primo o secondo anno di università, sono demandate, per gli studenti interessati, a corsi successivi.

Ai paragrafi sulla meccanica quantistica premettiamo un rapido excursus sulla meccanica analitica, che completa i risultati di Newton. A rigore si tratta di approfondimenti formali della meccanica newtoniana, che vengono proposti normalmente in corsi successivi a quelli di fisica generale. Riteniamo però opportuno introdurne qui alcuni concetti, sia per la loro valenza culturale che per la propedeuticità alla meccanica quantistica.

## 12.1 Meccanica analitica

**Meccanica analitica  
o meccanica razionale**

Quando i principi fondamentali della **meccanica** devono essere applicati per studiare sistemi meccanici particolarmente complessi è necessario utilizzare strumenti analitici che rendano la trattazione agevole. In seguito alla formulazione dei **principi della dinamica** e dei **metodi dell'analisi differenziale** ad opera di Newton, generazioni di scienziati si sono adoperate per sviluppare approcci analitici sempre più raffinati. È così sorto e si è poi espanso, dal diciottesimo al ventesimo secolo, il campo della **meccanica analitica** o **meccanica razionale**. I contributi più rilevanti sono stati dati da Lagrange e Hamilton, integrati da Jacobi, Poisson e Noether.

I sistemi meccanici studiati dalla meccanica analitica sono composti da un **numero finito di punti materiali**, soggetti a forze e liberi di muoversi in uno spazio vettoriale tridimensionale o su un suo sottoinsieme rappresentato da una varietà differenziabile, ad esempio una curva o una superficie. La meccanica analitica descrive anche sistemi costituiti da un numero infinito di punti materiali, che però sono soggetti a vincoli che ne rendono finito il numero di gradi di libertà, come ad esempio il caso dei **corpi rigidi**.

Oltre a sviluppare modelli che siano in grado di **interpretare i dati sperimentali provenienti da esperimenti condotti su sistemi meccanici complessi**, la meccanica analitica è diretta alla **sviluppo e generalizzazione delle strutture matematiche** utilizzate per tali modelli.

Nonostante i sistemi studiati ricadano nel campo della meccanica classica, la meccanica analitica ha sviluppato formalismi che risultano di particolare utilità in fisica moderna, ad esempio nella teoria della relatività e nella meccanica quantistica.

## 12.2 Formalismo lagrangiano

In meccanica classica molto spesso la posizione di un punto materiale è determinata dal suo raggio vettore  $\mathbf{r}$ , le cui componenti corrispondono alle coordinate cartesiane  $x, y, z$ . Nei capitoli precedenti abbiamo incontrato dei casi in cui la posizione di un punto non è data in termini delle sue coordinate cartesiane ma di altre coordinate. Ad esempio nel pendolo semplice, il moto viene descritto mediante l'angolo  $\theta$  tra il filo e la direzione verticale.

In un sistema di  $n$  punti non vincolati la posizione nello spazio è determinata da  $n$  raggi vettori, cioè da  $3n$  coordinate, e si dice che il sistema ha  $h = 3n$  **gradi di libertà**. Tali grandezze non sono necessariamente le coordinate cartesiane. Può risultare più comodo utilizzare un altro sistema di coordinate, a seconda del particolare problema che si sta studiando. Nel caso in cui siano presenti vincoli si può avere una riduzione dei gradi di libertà a  $h \leq 3n$ . Definiamo **coordinate generalizzate** un numero  $h$  di grandezze opportune  $q_1, q_2, \dots, q_h$  che caratterizzano univocamente la posizione di un sistema con  $h$  gradi di libertà. Notiamo che non necessariamente tali grandezze hanno le dimensioni fisiche di una lunghezza; per alcune potrebbe trattarsi di un angolo, di un volume, di un'energia, ecc.

Le derivate prime rispetto al tempo delle  $q_i$  vengono dette **velocità generalizzate** e sono rappresentate mediante la notazione  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_h$  in cui il puntino indica la derivazione rispetto al tempo  $t$ . Nel caso del pendolo semplice si ha  $h = 1$ ,  $q_1 = \theta$  e  $\dot{q}_1 = \frac{d\theta}{dt} = \omega$ , dove  $\omega$  è la velocità angolare. Per un punto materiale vincolato a

**Coordinate generalizzate**

**Velocità generalizzate**

muoversi su una superficie cilindrica (figura 12.1),  $q_1 = \phi$ ,  $q_2 = z$ ,  $\dot{q}_1 = \frac{d\phi}{dt} = \omega$ ,  $\dot{q}_2 = \frac{dz}{dt} = v_z$ .

Per determinare lo **stato meccanico** di un sistema ad un certo istante  $t$ , se è nota la funzione **energia potenziale**, è sufficiente conoscere i valori di tutte le coordinate e velocità generalizzate a tale  $t$ . In tal caso infatti siamo in grado, a partire dalle  $q_i$  dello stato  $t$ , di prevedere quelle ad un istante successivo  $t + dt$ . Vedremo nel seguito che, dal punto di vista analitico, ciò significa che, la conoscenza ad un istante  $t$  di tutte le coordinate  $q_i$  e velocità  $\dot{q}_i$  permette di determinare univocamente il valore delle **accelerazioni generalizzate**  $\ddot{q}_i$  a tale istante, mediante delle relazioni, dette **equazioni del moto**, che legano le accelerazioni alle  $q_i$  e  $\dot{q}_i$ .

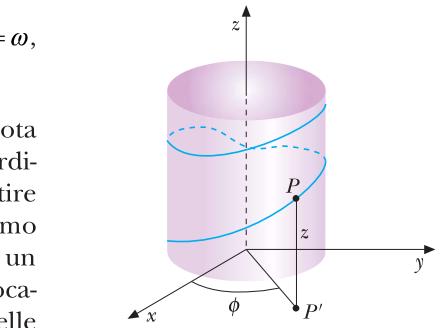
Nel formalismo lagrangiano ogni sistema meccanico è descritto da una specifica funzione

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}(q_1, q_2, \dots, q_h; \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_h; t), \quad (12.1)$$

che viene detta **funzione di Lagrange o lagrangiana** del sistema e per semplicità abbreviata con  $\mathcal{L} = \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ . Dal momento che lo stato di un sistema dipende solo da  $\mathbf{q}$  e  $\dot{\mathbf{q}}$ , la **lagrangiana è funzione solamente delle  $\mathbf{q}$  e  $\dot{\mathbf{q}}$**  ma non delle derivate di ordine superiore  $\ddot{\mathbf{q}}$ ,  $\dddot{\mathbf{q}}$ , ecc. Notiamo che  $\mathcal{L}$  dipende implicitamente da  $t$ , attraverso la dipendenza da  $t$  delle  $\mathbf{q}$  e  $\dot{\mathbf{q}}$ .  $\mathcal{L}$  può dipendere anche esplicitamente da  $t$ , ad esempio se uno o più punti sono costretti a muoversi su superfici o curve (vincoli) in moto rispetto all'osservatore oppure se le forze cui sono sottoposti variano nel tempo.

La formulazione più generale della legge del moto di un sistema dinamico può essere ricondotta al **principio di minima azione** o **principio di Hamilton**. Supponiamo che, in un sistema di riferimento inerziale, un sistema dinamico conservativo occupi agli istanti  $t_1$  e  $t_2$  gli stati identificati dai valori delle coordinate generalizzate, rispettivamente  $\mathbf{q}^{(1)} = \mathbf{q}(t_1)$  e  $\mathbf{q}^{(2)} = \mathbf{q}(t_2)$ . Il principio stabilisce che

nell'evoluzione dallo stato 1 allo stato 2, il sistema si muove sempre in modo che il seguente integrale, denominato **azione**, abbia un valore estremo (massimo o minimo)



**Figura 12.1** Punto materiale vincolato a muoversi su una superficie cilindrica.

### Funzione di Lagrange o lagrangiana

### Principio di minima azione

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) dt . \quad (12.2)$$

Storicamente nella prima formulazione il principio stabiliva che l'integrale dovesse essere minimo, da cui il nome del principio.

Senza entrare nei dettagli analitici, si può dimostrare che dal principio di minima azione si possono derivare le equazioni del moto del sistema dinamico, dette **equazioni di Eulero-Lagrange**. Per una trattazione completa si rimanda ai testi specialistici di meccanica analitica. Per un sistema con  $h$  gradi di libertà si hanno le  $h$  equazioni differenziali

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, h) . \quad (12.3)$$

### Equazioni di Eulero-Lagrange

Se è nota l'espressione analitica della lagrangiana, allora le (12.3) fissano il legame tra le accelerazioni, le coordinate e le velocità generalizzate.

Le (12.3) sono un sistema di  $h$  equazioni differenziali del secondo ordine per le  $h$  funzioni incognite  $q_i(t)$ . La soluzione generale conterrà  $2h$  costanti di integrazione arbitrarie. Per determinare esattamente l'evoluzione temporale dello stato del sistema occorrerà calcolare tali costanti, ad esempio dalla conoscenza dei valori iniziali delle coordinate e velocità generalizzate che caratterizzano lo stato ad un certo istante iniziale.

Le derivate della lagrangiana rispetto alle velocità generalizzate

$$p_i = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \quad (12.4)$$



# Secondo principio della termodinamica

## capitolo 15

Il primo principio della termodinamica non pone limiti al verso degli scambi di calore e lavoro di un sistema termodinamico che compia dei cicli termici. Tuttavia l'evidenza sperimentale mostra che la situazione non è simmetrica. Si verifica che è sempre possibile trasformare integralmente lavoro in calore ceduto ad una sorgente lasciando il sistema nello stato iniziale ( $\Delta U = 0$ ), come mostrato in figura 15.1a, ad esempio sfruttando una forza dissipativa. Invece la trasformazione ciclica contraria, mostrata in figura 15.1b, che trasforma integralmente calore prelevato da una sorgente in lavoro non viene mai osservata, pur rispettando il primo principio.

Il problema pratico della trasformazione di *calorico in forza motrice* portò Carnot, già nel 1824, a formulare i fondamenti del secondo principio della termodinamica.

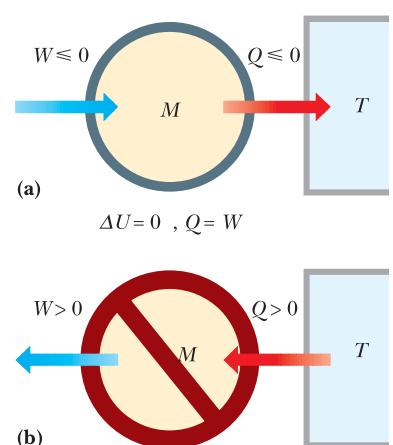
### 15.1 Secondo principio della termodinamica

Prendiamo in esame il caso di una **macchina termica** che compie un ciclo termico scambiando calore con due sorgenti. Si verifica sempre la situazione schematizzata in figura 15.2: il calore scambiato complessivamente dal sistema, che viene utilizzato per far funzionare la macchina  $M$ , con le due sorgenti di calore alle temperature  $T_1$  e  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ) è dato dalla somma di una quantità  $Q_A$  assorbita dalla sorgente a temperatura maggiore, e di una quantità  $Q_C$ , ceduta alla sorgente a temperatura minore. Si osserva che è sempre  $Q_C < 0$ , cioè non succede mai  $Q_C = 0$  o  $Q_C > 0$ . Tale risultato comporta che  $Q_A$  non viene trasformato integralmente in lavoro ma una parte  $Q_C$  viene sempre ceduta alla sorgente a temperatura inferiore. In accordo con il primo principio ( $\Delta U = 0$  in un processo ciclico), il lavoro è  $W = Q = Q_A + Q_C$ ; tuttavia, non si ha mai  $W = Q_A$ , bensì  $W < Q_A$  essendo  $Q_C < 0$ .

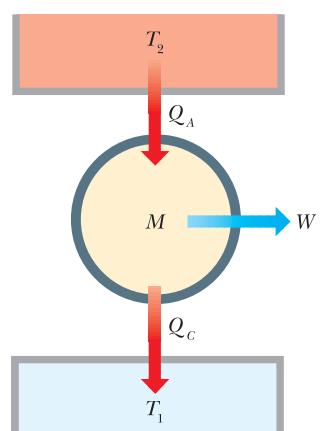
Nel caso di più sorgenti con cui la macchina  $M$  scambia calore la situazione è analoga. La somma dei calori assorbiti non si trasforma mai totalmente in lavoro, una parte viene sempre ceduta restando cioè sotto forma di calore scambiato. Non esistono esempi contrari. Ciò porta alla conclusione che in un processo ciclico vi è una impossibilità di trasformazione integrale di calore in lavoro ovvero che la trasformazione di calore in lavoro è sempre accompagnata da cessione di calore.

Se un processo non è ciclico è possibile ottenere una trasformazione integrale di calore in lavoro, poiché essa non è l'unico risultato finale del processo che comporta una variazione dello stato termodinamico del sistema. Per esempio, in una espansione isoterma di un gas ideale,  $\Delta U = 0$  perché  $T$  è costante e quindi  $W = Q$ , però lo stato finale del gas differisce da quello iniziale dato che il volume è aumentato e la pressione diminuita. Se volessimo riportare il gas nello stato iniziale, con una generica trasformazione, per costruire un ciclo termico, dovremmo assorbire lavoro e cedere calore, ricadendo nel caso precedente.

Accanto all'impossibilità finora discussa esiste un'altra impossibilità sperimentale. Se consideriamo due corpi a temperatura diversa e li mettiamo a contatto termico, c'è sempre una cessione di calore dal corpo caldo al corpo freddo fino a che si raggiunge l'equilibrio termico. Il calore non passa mai spontaneamente dal corpo freddo a quello caldo. È possibile fare avvenire tale passaggio, come si realizza in una macchina frigorifera, ma deve essere eseguito un lavoro sulla sostanza che compie il ciclo.



**Figura 15.1** Processi ciclici che rispettano il primo principio della termodinamica. Il processo (a) si verifica comunemente in natura, quello (b) non si verifica mai (è estremamente improbabile).



**Figura 15.2** Macchina ciclica che opera come motore termico.

### Secondo principio della termodinamica

## Enunciati del secondo principio

**Il secondo principio della termodinamica** consiste nel prendere atto delle impossibilità sperimentali descritte, che non presentano eccezioni conosciute, e nel trasformarle in postulati, secondo i seguenti enunciati.

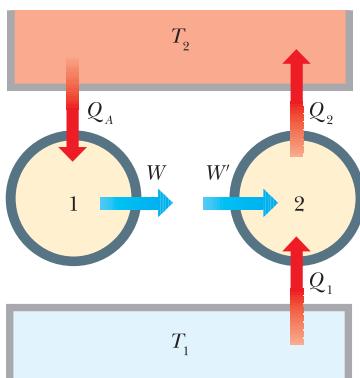
### Enunciato di Kelvin-Planck

È impossibile realizzare un processo che abbia come unico risultato la trasformazione in lavoro del calore fornito da una sorgente a temperatura uniforme.

### Enunciato di Clausius

È impossibile realizzare un processo che abbia come unico risultato il trasferimento di una quantità di calore da un corpo ad un altro a temperatura maggiore.

L'aggettivo **unico** utilizzato nei due enunciati è essenziale. Abbiamo infatti già visto negli esempi dell'espansione isoterma di un gas ideale e del ciclo frigorifero che tali processi, proibiti dal secondo principio, sono possibili se però non costituiscono l'unico risultato.



**Figura 15.3** La violazione dell'enunciato di Kelvin-Planck porta alla violazione di quello di Clausius.

## Equivalenza degli enunciati del secondo principio

Gli enunciati di Kelvin-Planck e di Clausius, pur se riferiti a fatti sperimentali che appaiono molto diversi, sono strettamente connessi in quanto se fosse possibile realizzare uno dei processi proibiti sarebbe possibile realizzare anche l'altro.

Supponiamo infatti che sia possibile realizzare un processo ciclico che trasformi integralmente calore in lavoro, in contrasto con l'enunciato di Kelvin-Planck. Ciò è rappresentato nella figura 15.3, dove la macchina termica 1 produce il lavoro  $W$  trasformando il calore  $Q_A$  assorbito dalla sorgente a temperatura  $T_2$ ; si ha  $W = Q_A$  ed è nulla la cessione di calore alla sorgente fredda. Utilizziamo il lavoro  $W$  per far funzionare una macchina frigorifera, che preleva il calore  $Q_1$  dalla sorgente a temperatura  $T_1$  e cede il calore  $Q_2$  alla sorgente a temperatura  $T_2 > T_1$ . La seconda macchina non contraddice l'enunciato di Clausius dato che nel processo interviene il lavoro  $W' = -W$  fatto sul sistema (il lavoro  $W$  fatto dalla macchina 1 è positivo, mentre  $W'$  è subito dalla macchina 2 ed è negativo; le due quantità sono eguali in modulo, ma opposte in segno). Il bilancio della macchina 2, sulla base del primo principio, è

$$Q_1 + Q_2 = W' = -W .$$

La macchina complessiva, costituita dall'insieme delle due macchine, assorbe  $Q_1$  a temperatura  $T_1$  e scambia

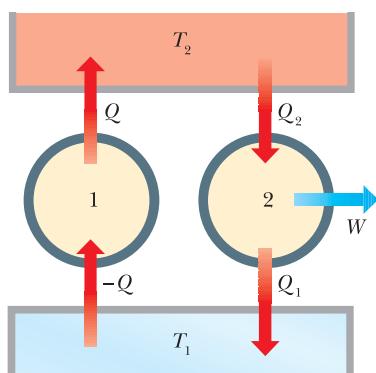
$$Q_A + Q_2 = W + Q_2 = -Q_1$$

a temperatura  $T_2$ . Se  $Q_1$  è assorbito,  $-Q_1$  è ceduto. Il lavoro della macchina complessiva è nullo in quanto non c'è scambio di lavoro con l'ambiente esterno e l'unico risultato pertanto è il passaggio spontaneo di calore dalla sorgente a temperatura inferiore a quella a temperatura superiore, violando l'enunciato di Clausius.

Supponiamo ora di poter realizzare una macchina che come unico risultato faccia passare il calore  $Q$  da una sorgente a temperatura  $T_1$  ad un'altra a temperatura  $T_2 > T_1$ , come mostrato in figura 15.4, e consideriamo una seconda macchina che operi tra le due sorgenti in accordo col secondo principio. Dimensioniamo la seconda macchina in modo che  $Q_1 = Q$ , cioè in modo da cedere alla sorgente a  $T_1$  lo stesso calore che viene assorbito dalla prima macchina. Pertanto alla fine di un ciclo della macchina complessiva la sorgente a  $T_1$  non scambia calore e il lavoro prodotto è dato da

$$W = Q_2 + Q_1 = Q_2 + Q$$

ed è positivo, perché  $Q_2 > |Q_1| = |Q|$ . Tale lavoro è eguale al calore complessivamente scambiato con la sorgente a  $T_2$  e in conclusione l'unico risultato è la trasfor-



**Figura 15.4** La violazione dell'enunciato di Clausius porta alla violazione di quello di Kelvin-Planck.

mazione integrale in lavoro del calore assorbito da una sola sorgente (a temperatura  $T_2$ ), violando l'enunciato di Kelvin-Planck.

L'unione dei risultati ottenuti costituisce la cosiddetta **equivalenza tra i due enunciati del secondo principio della termodinamica** nel senso che abbiamo visto: la negazione di uno ha come conseguenza la negazione dell'altro.

Notiamo che nella dimostrazione dell'equivalenza tra gli enunciati abbiamo implicitamente ammesso che le macchine collegate tra loro per formarne una complessiva compissero lo stesso numero di cicli nell'unità di tempo, ossia che a un ciclo completo di una corrispondesse un ciclo completo dell'altra. Si introduce questa ipotesi per semplicità e noi continueremo a farlo; peraltro i risultati ottenuti non dipendono da tale ipotesi.

Avvertiamo infine che nel resto del capitolo quando useremo il termine macchina intenderemo, come in questo paragrafo, indicare un sistema che compie un ciclo termodinamico qualsiasi, in particolare termico o frigorifero, reversibile o irreversibile. Da un punto di vista solamente termico l'ambiente, per una macchina o un sistema di macchine, è costituito dall'insieme di sorgenti o di corpi con cui avvengono gli scambi di calore.

## Ciclo monotermo

Conseguenza immediata del secondo principio, nell'enunciato di Kelvin-Planck, è che: in un processo ciclico per produrre effettivamente lavoro sono necessarie sempre almeno due sorgenti, cioè non può sussistere il risultato  $Q_C = 0$ , ma deve essere  $Q_A > |Q_C|$  e quindi, secondo (14.26),  $\eta < 1$ .

In particolare, per un processo ciclico che si svolge utilizzando una sola sorgente, detto anche **ciclo monotermo**, non essendo possibile assorbire calore e produrre lavoro senza violare il secondo principio, devono valere le diseguaglianze

$$Q \leq 0 , \quad W \leq 0 ,$$

come mostrato in figura 15.1a. Pertanto il sistema che compie il ciclo monotermo assorbe lavoro dall'ambiente esterno e cede calore alla sorgente, ossia trasforma integralmente lavoro in calore, senza limite alcuno, oppure non ha scambi energetici,  $Q = 0$  e  $W = 0$ .

Se il ciclo monotermo è reversibile esso può venire percorso in senso contrario e, come sappiamo dal paragrafo 13.6, in tal caso gli scambi di calore e lavoro cambiano di segno: dovrebbero valere allora la diseguaglianze

$$Q \geq 0 , \quad W \geq 0 .$$

Poiché il segno di maggiore è in contrasto con il secondo principio, per un ciclo monotermo reversibile deve essere sempre, indipendentemente dal verso di percorrenza,

$$Q = 0 , \quad W = 0 .$$

## Ciclo monotermo

## 15.2 Reversibilità e irreversibilità

Nel capitolo 13 abbiamo posto l'attenzione, nel descrivere la reversibilità o irreversibilità di un processo, sulle caratteristiche di equilibrio degli stati termodinamici attraversati da un sistema. Estendiamo ora le nostre considerazioni all'ambiente.

Quando viene compiuta una trasformazione reversibile da uno stato  $A$  ad uno stato  $B$ , con scambio delle quantità  $Q_{AB}$  e  $W_{AB}$  tra il sistema e l'ambiente, è sempre possibile ripercorrerla in senso inverso, scambiando le quantità  $-Q_{AB}$  e  $-W_{AB}$ . Alla fine sistema e ambiente sono ritornati ai rispettivi stati iniziali, dato che lo scambio totale di calore e lavoro è nullo per entrambi. Tale considerazione si estende ai cicli reversibili. Alla fine di un ciclo il sistema torna sempre nello stato iniziale, ma l'ambiente ha subito una modifica perché ha, per esempio, ceduto calore e assorbito lavoro. Percorrendo il ciclo in senso inverso gli scambi energetici dell'ambiente sono eguali ed opposti ed esso ritorna nello stato iniziale.



P. Mazzoldi • M. Nigro • C. Voci

# Fisica

## Meccanica e Termodinamica

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**.