

Comprende



versione **Ebook**
e **Software**
di simulazione

Lamberto Duò • Paola Taroni

Fisica

Meccanica e Termodinamica

Cosimo D'Andrea

Marco Finazzi

Dario Polli

Lorenzo Spinelli

Alberto Tagliaferri



Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

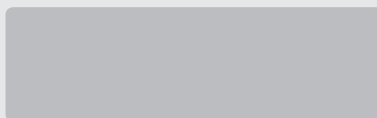
Espandi le tue risorse

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



Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e attivare 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**.

Lamberto Duò

Paola Taroni

FISICA

Meccanica e Termodinamica

Cosimo D'Andrea

Marco Finazzi

Dario Polli

Lorenzo Spinelli

Alberto Tagliaferri



L. Duò, P. Taroni

Fisica Meccanica e Termodinamica

Copyright © 2021, Edises Edizioni S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

2025 2024 2023 2021 2021

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.

Fotocomposizione

doma book di Massimo Di Grazia – Napoli

Stampato presso la

Petruzzi S.r.l. – Via Venturelli 7/b – 06012 Città di Castello (PG)

per conto della

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

www.edisesuniversita.it

assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 028 0

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

Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma assistenza.edises.it

Prefazione

Dopo averci a lungo ragionato, abbiamo deciso di dedicarci alla realizzazione di un progetto che copre gli argomenti generalmente insegnati nei corsi di Fisica di base nelle Scuole di Ingegneria e Scienze e comprende sia i libri di testo che gli eserciziari.

Questo primo volume e il corrispondente eserciziario sono dedicati alla Meccanica e alla Termodinamica e, come tutto il progetto, sono stati concepiti e sviluppati coralmemente, valorizzando l'esperienza di tanti docenti del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Milano.

Abbiamo cercato di trattare tutti i principali argomenti di possibile interesse per gli insegnamenti di base, lasciando ai singoli docenti la possibilità di disegnare il loro percorso all'interno del quadro proposto, alla luce della specifiche caratteristiche del loro insegnamento.

Invitiamo gli studenti a non farsi frenare dal formalismo matematico a volte complesso ma necessario per una corretta descrizione quantitativa. La matematica rappresenta uno strumento fondamentale, ma l'oggetto della Fisica rimane la descrizione di tutta la realtà che ci circonda ed il rigore matematico deve sempre essere accompagnato dalla descrizione fenomenologica.

Auguriamo buon lavoro a docenti e studenti e li invitiamo tutti a farci avere correzioni e suggerimenti che possano contribuire a migliorare il testo (assistenza.edises.it).

Lamberto Duò, Paola Taroni

Indice generale

Prefazione.....	III
1 Grandezze fisiche e misure	
1.1 Introduzione.....	1
1.2 Metodo scientifico.....	2
1.3 Grandezze fisiche e loro misura.....	5
1.3.1 Grandezze fisiche.....	5
1.3.2 Misura diretta e indiretta, grandezze fondamentali e derivate.....	5
1.3.3 Sistemi di unità di misura.....	6
Approfondimento 1.1 Evoluzione storica della definizione di metro.....	8
1.3.4 Indici di stato fisico.....	9
1.3.5 Analisi dimensionale.....	10
1.3.6 Analisi e rappresentazione di misure sperimentali.....	11
2 Vettori	
2.1 Grandezze fisiche scalari e vettoriali.....	17
2.1.1 Rappresentazione grafica, vettori liberi e applicati.....	18
2.2 Operazioni tra vettori.....	19
2.2.1 Prodotto di un vettore per uno scalare, vettore opposto, vettore nullo e versore.....	19
2.2.2 Somma di vettori.....	20
2.2.3 Differenza di vettori.....	21
2.2.4 Prodotto scalare.....	21
Approfondimento 2.1 Il teorema di Carnot.....	22
2.2.5 Prodotto vettore.....	23
2.3 Scomposizione di vettori.....	24
2.3.1 Scomposizione nel piano.....	24
2.3.2 Scomposizione nello spazio.....	24
2.3.3 Rappresentazione cartesiana ortogonale.....	24
Approfondimento 2.2 Invarianza delle leggi fisiche.....	27
2.4 Derivate di vettori.....	28
2.4.1 Definizione.....	28
2.4.2 Proprietà.....	30
2.4.3 Derivate di versori.....	31
Approfondimento 2.3 Direzione della derivata di un versore.....	31
2.4.4 Scrittura intrinseca della derivata di un vettore.....	33
2.5 Momento di un vettore applicato rispetto a un polo.....	33
2.6 Coordinate piane polari.....	35
2.7 Gradiente e nabla.....	36

MECCANICA

3 Moto in una dimensione	
3.1 Introduzione alla Cinematica del corpo puntiforme.....	41
3.2 Moto rettilineo.....	43
3.3 Spostamento e velocità nel moto rettilineo.....	45
3.4 Dalla velocità alla posizione: il problema inverso.....	48
3.5 Accelerazione nel moto rettilineo.....	50
3.6 Moto di caduta verticale.....	52

4	Moto in più dimensioni	
4.1	Moto piano	56
4.1.1	Vettori posizione e spostamento	56
4.1.2	Vettore velocità media	57
4.1.3	Vettore velocità istantanea	57
4.1.4	Vettore accelerazione	61
	Approfondimento 4.1 Sistema di riferimento "intrinseco" (\vec{u}_t, \vec{u}_n) e sistema di riferimento "estrinseco" ($\vec{u}_r, \vec{u}_\theta$)	62
	Approfondimento 4.2 Accelerazione in coordinate cartesiane e polari	64
4.2	Moto del proiettile	65
4.3	Moto circolare	68
	Approfondimento 4.3 Versore tangente e versore normale nel moto circolare in componenti cartesiane e polari	69
4.3.1	Moto circolare uniforme	71
4.3.2	Moto circolare uniformemente accelerato	71
4.4	Moto in tre dimensioni	72
5	Dinamica del punto	
5.1	Introduzione	75
	Approfondimento 5.1 Le interazioni fondamentali	76
	Approfondimento 5.2 Il dinamometro	77
5.2	Principio di inerzia e sistemi inerziali	78
5.3	La massa	81
	Approfondimento 5.3 La massa inerziale	82
5.4	Il secondo Principio della Dinamica	83
5.5	Il terzo Principio della Dinamica	84
5.6	Quantità di moto e sua conservazione	86
5.7	Impulso di una forza	87
6	Applicazioni dei principi della Dinamica	
6.1	Risultante delle forze e principio di sovrapposizione degli effetti	91
6.2	Forza peso	93
6.3	Reazioni vincolari	94
6.3.1	Vincoli lisci ideali	95
6.3.2	Funi e carrucole	96
	Approfondimento 6.1 La fune pesante	98
6.4	Attrito	99
6.4.1	Attrito radente	100
	Approfondimento 6.2 Spiegazione microscopica dell'attrito radente	104
6.4.2	Attrito viscoso	106
7	Moti oscillatori	
7.1	Moti periodici	109
7.2	Moto armonico semplice	110
7.2.1	Moto sotto l'azione di una forza elastica (legge di Hooke)	110
	Approfondimento 7.1 Comportamento dei materiali: diagramma sforzo-deformazione	111
	Approfondimento 7.2 Soluzione dell'equazione del moto armonico	117
7.2.2	Il pendolo semplice	118
7.2.3	Moto circolare uniforme e sua scomposizione in moti armonici: notazione complessa di un moto armonico	120
7.3	Moto armonico smorzato	121
	Approfondimento 7.3 Soluzione dell'equazione del moto armonico smorzato	122
7.4	Moto armonico forzato e risonanza	127
	Approfondimento 7.4 Oscillazioni forzate	129
	Approfondimento 7.5 La riga di risonanza	129
7.5	Composizione di moti armonici lungo assi paralleli e ortogonali	132

7.5.1	Moti armonici lungo lo stesso asse	132
	Approfondimento 7.6 Composizione di moti armonici lungo lo stesso asse	134
7.5.2	Moti armonici lungo assi ortogonali	135
	Approfondimento 7.7 Composizione di moti armonici lungo assi ortogonali	137
7.6	Analisi di Fourier	138
	Approfondimento 7.8 L'integrale di Fourier	140

8 Lavoro ed energia

8.1	Lavoro elementare e finito di una forza	141
8.2	Potenza	144
8.3	Energia cinetica	146
8.4	Forze conservative ed energia potenziale	148
	8.4.1 Forza peso	150
	8.4.2 Forza elastica	150
	8.4.3 Forze centrali a simmetria sferica	151
8.5	Energia meccanica	151
	Approfondimento 8.1 Energia a riposo di una particella isolata	154
	Approfondimento 8.2 Interazioni fondamentali e forze dissipative	155
8.6	Forza come gradiente dell'energia potenziale	156
	Approfondimento 8.3 Lavoro elementare di una forza conservativa come differenziale esatto	158
8.7	Energia potenziale ed equilibrio	158
	Approfondimento 8.4 Principio di minimizzazione dell'energia	159
8.8	Oscillazioni attorno a un punto di equilibrio	160
	Approfondimento 8.5 Generalizzazione al caso tridimensionale del moto di una particella attorno a un punto di equilibrio stabile	163

9 Moti relativi

9.1	Introduzione	165
9.2	Cinematica relativa	166
	9.2.1 Composizione degli spostamenti	166
	9.2.2 Composizione delle velocità	167
	9.2.3 Composizione delle accelerazioni	169
	9.2.4 Esempi di moto relativo: moto relativo traslatorio e Principio di Relatività galileiana	169
	Approfondimento 9.1 Principio di Relatività e trasformazioni di Galileo	170
	9.2.5 Esempi di moto relativo: moto relativo rotatorio uniforme	171
9.3	Dinamica relativa e forze d'inerzia	171
	Approfondimento 9.2 Forza centrifuga sulla superficie terrestre	175
	Approfondimento 9.3 Precessione del piano di oscillazione di un pendolo	177
	Approfondimento 9.4 Forza di Coriolis in meteorologia e oceanografia	178

10 Dinamica dei sistemi di particelle

10.1	Introduzione	181
10.2	Prima equazione cardinale	181
10.3	Conservazione della quantità di moto	183
10.4	Centro di massa	184
	10.4.1 Teorema del centro di massa	185
10.5	Momento di una forza	187
	10.5.1 Momento della forza peso e baricentro	188
	Approfondimento 10.1 Il salto "alla Fosbury"	188
10.6	Seconda equazione cardinale e momento angolare	188
	Approfondimento 10.2 Interazioni fra particelle non puntiformi	190
10.7	Conservazione del momento angolare	191
	Approfondimento 10.3 Massa in rotazione	192
10.8	Teoremi di König	193
	Approfondimento 10.4 Seconda equazione cardinale dei sistemi riferita a un polo mobile	195

10.9	Conservazione dell'energia in un sistema isolato	196
	Approfondimento 10.5 Invarianza e leggi di conservazione	198
11	Meccanica dell'urto	
11.1	Definizione di urto	199
11.2	Teorema dell'impulso	200
11.3	Fenomeni impulsivi e approssimazione impulsiva	202
11.4	Classificazione degli urti	204
11.5	Urto elastico	205
	Approfondimento 11.1 Velocità relative in un urto elastico	209
11.6	Urto perfettamente anelastico	210
11.7	Urti nel sistema di riferimento del centro di massa	211
11.8	Urto obliquo	213
12	Corpo rigido	
12.1	Introduzione	217
	Approfondimento 12.1 Sistemi continui e calcolo della posizione del centro di massa	219
12.2	Cinematica del corpo rigido	221
12.3	Energia cinetica e momento di inerzia	222
12.4	Teorema di Huygens-Steiner	226
	12.4.1 Dimostrazione del Teorema di Huygens-Steiner	226
12.5	Dinamica del corpo rigido	229
	Approfondimento 12.2 Forza peso applicata su un corpo rigido esteso	232
	Approfondimento 12.3 Giroscopio	237
12.6	Conservazione del momento angolare	239
12.7	Lavoro ed energia	241
12.8	Rotolamento	245
	Approfondimento 12.4 Condizioni per il rotolamento puro	246
12.9	Equilibrio statico	251
	Approfondimento 12.5 Scelta del polo nel calcolo del momento risultante delle forze esterne nel caso statico	252
12.10	Elasticità	254
13	Gravitazione universale	
13.1	Introduzione: Leggi di Keplero	259
13.2	Legge di gravitazione universale	262
	Approfondimento 13.1 Dalle leggi di Keplero alla Legge di Gravitazione Universale	263
	Approfondimento 13.2 Problema dei due corpi	267
13.3	Esperimento di Cavendish	268
13.4	Massa inerziale e gravitazionale	270
13.5	Studio delle orbite – Costanti del moto	271
	Approfondimento 13.3 Calcolo della forza gravitazionale tra un corpo sferico omogeneo e un punto materiale	279
13.6	Campo gravitazionale	281
14	Meccanica dei fluidi	
14.1	Stati di aggregazione della materia	283
14.2	Fluidi perfetti, fluidi reali e viscosità	284
14.3	Pressione e sforzo di taglio	286
14.4	Forze di volume, densità ed equilibrio statico	288
14.5	Isotropia della pressione	289
	Approfondimento 14.1 Relazione tra le aree delle superfici laterali di un tetraedro trirettangolo	291
	Approfondimento 14.2 Dimostrazione del teorema di De Gua	292
14.6	Equazione della statica dei fluidi	292
14.7	Liquidi perfetti: legge di Stevino	294
14.8	Applicazioni della legge di Stevino: legge di Pascal, pressa idraulica e vasi comunicanti	295

14.9	Metodi di misura della pressione	297
14.9.1	Manometri a liquido	297
14.10	Variazione della pressione atmosferica con la quota	299
14.11	Legge di Archimede	300
14.12	Liquido in rotazione	303
14.13	Introduzione alla dinamica dei fluidi	306
14.14	Equazione di continuità	307
14.15	Teorema di Bernoulli	310
14.16	Applicazioni del teorema di Bernoulli: teorema di Torricelli e tubo di Venturi	313

15 Fenomeni ondulatori

15.1	Introduzione	317
15.2	Onde longitudinali	319
15.3	L'equazione delle onde	320
15.4	Onde monocromatiche	322
	Approfondimento 15.1 Velocità di gruppo	324
15.5	Onde stazionarie	327
15.6	Onde trasversali	329
	Approfondimento 15.2 Energia e quantità di moto trasportate dalle onde	330
15.7	Modi normali in una corda vibrante	332
15.8	Trasmissione e riflessione di onde elastiche	334
	Approfondimento 15.3 Impedenza dei mezzi	338
15.9	Onde sonore	339
	Approfondimento 15.4 Velocità del suono in aria	342
	Approfondimento 15.5 Intensità sonora e orecchio umano	344
15.10	Effetto Doppler	346

16 Teoria della relatività

16.1	Introduzione	351
16.2	Propagazione della luce	351
16.3	Esperimento di Michelson-Morley	352
16.4	Postulati della Relatività Ristretta	353
16.5	Trasformazioni di Lorentz	354
16.6	Simultaneità e Principio di causalità	356
16.7	Dilatazione del tempo e contrazione delle lunghezze	357
	Approfondimento 16.1 Decadimento di muoni	357
16.8	Trasformazione relativistica delle velocità	359
	Approfondimento 16.2 Esperimento di Fizeau	359
16.9	Energia cinetica e quantità di moto	360
16.10	Conservazione di energia e quantità di moto	361
16.11	Secondo Principio della Dinamica	363
	Approfondimento 16.3 Particella sulla quale agisce una forza costante	363
16.12	Massa	364

TERMODINAMICA

17 Sistemi termodinamici, grandezze termodinamiche e temperatura

17.1	Introduzione alla Termodinamica	369
17.2	Novità della Termodinamica	370
17.3	I sistemi termodinamici	371
	Approfondimento 17.1 Esempi di sistemi termodinamici	372
	Approfondimento 17.2 Natura della frontiera tra due sistemi termodinamici	376
	Approfondimento 17.3 Esempi di frontiere di sistemi termodinamici in Natura	377
17.4	Grandezze termodinamiche	378
17.4.1	Stato microscopico di un sistema termodinamico	378

Approfondimento 17.4	Complessità computazionale dello stato microscopico di un sistema termodinamico	379
17.4.2	Grandezze macroscopiche	379
Approfondimento 17.5	Il moto caotico delle molecole in un fluido	380
Approfondimento 17.6	Carattere estensivo o intensivo delle grandezze macroscopiche	381
Approfondimento 17.7	Sistemi molto piccoli e infinitesimi	384
17.4.3	Grandezze macroscopiche di uso comune	386
17.5	Temperatura	388
17.5.1	Sorgenti di calore	388
17.5.2	Equilibrio termico	389
17.5.3	Il Principio Zero della Termodinamica	389
Approfondimento 17.8	Il Principio Zero della Termodinamica	390
17.5.4	Definizione operativa di una scala di temperatura	391
17.5.5	Il termometro a liquido e la scala Celsius	392
Approfondimento 17.9	Altri termometri a liquido	394
Approfondimento 17.10	Altre scale termometriche basate sull'utilizzo del termometro a liquido	394
Approfondimento 17.11	La dilatazione termica	395
Approfondimento 17.12	Dilatazione termica dell'acqua	398
17.5.6	Il termometro a gas ideale e la scala assoluta	398
Approfondimento 17.13	Il punto triplo dell'acqua come campione di temperatura	400
Approfondimento 17.14	Intervallo di temperatura misurabile tramite i termometri attuali	402
Approfondimento 17.15	La misura pratica della temperatura	402
18	Equilibrio termodinamico e trasformazioni	
18.1	Introduzione	403
18.2	Equilibrio termodinamico	403
18.2.1	Definizione dello stato di equilibrio termodinamico	404
18.2.2	Grandezze termodinamiche e funzioni di stato	405
Approfondimento 18.1	Microstati associati ad uno stato di equilibrio termodinamico	406
18.2.3	Variabili termodinamiche di stato ed equazioni di stato	408
Approfondimento 18.2	Misura delle grandezze macroscopiche di stato negli stati di non-equilibrio	409
18.2.4	Condizioni di equilibrio parziale	410
18.3	Complessità dei sistemi termodinamici	411
Approfondimento 18.3	Fluidi idrostatici	413
18.4	Equilibrio termodinamico dei sistemi termodinamici semplici	414
Approfondimento 18.4	Il potenziale chimico	416
18.5	L'equilibrio dei sistemi termodinamici complessi	418
18.6	Le trasformazioni termodinamiche	418
18.6.1	Trasformazioni reversibili e irreversibili	419
18.6.2	Trasformazioni quasi-statiche	421
18.6.3	Condizioni di reversibilità di una trasformazione termodinamica	421
19	Primo Principio della Termodinamica	
19.1	Introduzione	425
19.2	Il lavoro termodinamico	426
19.2.1	Definizione di lavoro termodinamico	426
19.2.2	Convenzione di segno del lavoro termodinamico	427
19.2.3	Effetti del lavoro termodinamico sull'ambiente	428
19.2.4	Trasformazioni tra stati di equilibrio termodinamico	430
19.2.5	Lavoro termodinamico: forze di interazione a distanza e forze di contatto	430
19.2.6	Lavoro termodinamico delle forze di contatto	431
19.2.7	Misura del lavoro termodinamico in una trasformazione irreversibile	432
19.2.8	Misura del lavoro termodinamico in una trasformazione quasi-statica	432
19.2.9	Rappresentazione grafica del lavoro termodinamico nelle trasformazioni quasi-statiche	434
19.2.10	Misura del lavoro termodinamico in una trasformazione reversibile	435

19.2.11	Lavoro termodinamico nei cicli termodinamici	438
19.2.12	Proprietà matematiche del lavoro termodinamico	440
Approfondimento 19.1	Origine microscopica della non esattezza del differenziale lavoro termodinamico	443
19.3	Il calore	443
19.3.1	Il calorimetro e la definizione operativa del calore	445
19.3.2	Proprietà matematiche del calore	447
19.4	Il primo Principio della Termodinamica	447
19.4.1	La conservazione dell'energia di un sistema termodinamico isolato	447
Approfondimento 19.2	Risoluzione spaziale dell'osservazione e suoi effetti sulla descrizione dell'energia di un sistema termodinamico	451
19.4.2	Gli esperimenti di Joule per la determinazione dell'equivalente meccanico del calore	452
Approfondimento 19.3	Il mulinello di Joule	454
19.4.3	Enunciato del primo Principio della Termodinamica	457
19.4.4	Proprietà dell'energia interna	458
19.4.5	Conseguenze del primo Principio della Termodinamica	459
19.4.6	Formulazione differenziale del primo Principio della Termodinamica	461

20 La calorimetria

20.1	Introduzione	463
20.2	Riscaldamento e raffreddamento – Capacità termica, calori specifici e molari	464
20.2.1	Capacità termica, calore specifico e calore molare – Grandezze medie	466
20.2.2	Capacità termica, calore specifico e calore molare – Grandezze differenziali	470
Approfondimento 20.1	Il calore specifico e molare dei solidi di sostanze monofasiche – Legge di Dulong-Petit	472
Approfondimento 20.2	Il calore specifico dei liquidi e dell'acqua	473
20.3	Conseguenze del primo Principio della Termodinamica sui trasferimenti di calore	473
Approfondimento 20.3	Grandezze calorimetriche in particolari trasformazioni	474
20.3.1	Temperatura di equilibrio di due sistemi termodinamici posti in contatto termico e meccanico	478
20.4	Transizioni di fase e calore latente	482
20.4.1	Transizioni di fase	482
20.4.2	Calore latente di transizione	483
20.5	Trasferimento e propagazione del calore	490
20.5.1	Trasferimento del calore per conduzione	490
20.5.2	Trasferimento del calore per convezione termica	495
20.5.3	Trasferimento del calore per irraggiamento	497
Approfondimento 20.4	Spettro di un corpo nero	498
Approfondimento 20.5	Barriere termiche e criostati	502

21 Gas ideali

21.1	Introduzione	505
21.2	Teoria atomica della materia	505
21.2.1	Quantità di materia	506
21.3	Equazione di stato di un gas ideale	507
21.3.1	Legge di Boyle - Mariotte	507
21.3.2	I Legge di Gay-Lussac o Legge di Charles	507
21.3.3	II Legge di Gay-Lussac	508
21.3.4	Legge di Avogadro	508
21.3.5	Equazione di stato dei gas ideali	508
21.4	Lavoro	509
21.5	Energia interna	510
21.6	Calori specifici e molari di un gas ideale	510
21.6.1	Relazione di Mayer	511
21.7	Rappresentazione nel piano di Clapeyron delle trasformazioni quasi statiche	512

21.7.1	Trasformazione isobara	512
21.7.2	Trasformazione isocòra	512
21.7.3	Trasformazione isoterma	513
21.7.4	Trasformazione adiabatica	513
21.8	Trasformazioni politropiche	515
	Approfondimento 21.1 Calore molare per una trasformazione politropica reversibile	516
21.9	Miscele di gas ideali	516
22	Cicli termodinamici e macchine	
22.1	Motori termici	519
22.2	Ciclo di Carnot	521
22.3	Motori a combustione interna	523
22.3.1	Ciclo Otto	523
22.3.2	Ciclo Diesel	525
	Approfondimento 22.1 Motori a combustione interna con turbocompressore	527
22.4	Cicli frigoriferi	528
	Approfondimento 22.2 Macchine frigorifere a compressione di vapore	529
23	Secondo e terzo Principio della Termodinamica	
23.1	Introduzione: simmetria di inversione temporale delle leggi della meccanica e irreversibilità dei fenomeni naturali	531
23.2	Secondo Principio della Termodinamica: enunciati di Clausius e Kelvin-Planck	533
23.2.1	Equivalenza degli enunciati di Clausius e di Kelvin-Planck del secondo Principio della Termodinamica	534
23.3	Teorema di Carnot	535
23.4	Temperatura termodinamica	536
23.5	Zero assoluto e terzo Principio della Termodinamica	537
23.6	Diseguaglianza di Clausius	537
23.7	Entropia	538
23.7.1	Entropia di un gas ideale	540
23.7.2	Entropia di solidi e liquidi	542
23.7.3	Diagramma T - S	543
23.8	Irreversibilità ed entropia	544
23.8.1	Legge di accrescimento dell'entropia	544
23.8.2	Equivalenza della legge di accrescimento dell'entropia e del secondo Principio della termodinamica	545
23.8.3	Entropia ed equilibrio termodinamico	547
	Approfondimento 23.1 Massimizzazione dell'entropia e reversibilità delle leggi della Meccanica	549
23.8.4	Potenziali termodinamici	549
23.9	Principio di degradazione dell'energia	551
23.10	Entropia e capacità termica al tendere della temperatura verso lo zero assoluto	553
	Approfondimento 23.2 Equivalenza degli enunciati del terzo Principio della Termodinamica	554
24	Teoria cinetica dei gas	
24.1	Introduzione	557
24.1.1	Macrostatto termodinamico e microstati	557
24.1.2	Probabilità e densità di probabilità	558
	Approfondimento 24.1 Sistemi ergodici e non ergodici	560
24.2	Legge di stato dei gas ideali	561
24.2.1	Calcolo della pressione	561
24.2.2	Interpretazione cinetica della temperatura di un gas ideale monoatomico	563
24.2.3	Energia interna e calore specifico di un gas ideale monoatomico	564
24.2.4	Gas ideali pluriatomici	564
	Approfondimento 24.2 Dipendenza del calore molare di un gas ideale dalla temperatura	567
24.3	Distribuzione di Maxwell-Boltzmann delle velocità	568
	Approfondimento 24.3 Cammino libero medio delle molecole in un gas ideale	571

24.4	Legge di stato dei gas reali	572
24.5	Fluttuazioni e interpretazione probabilistica dei fenomeni irreversibili	577
	Approfondimento 24.4 Ritorno spontaneo di un gas ideale alle condizioni iniziali dopo un'espansione adiabatica libera	579
24.5.1	Entropia e numero di microstati	580
	Approfondimento 24.5 Particelle indistinguibili	581
	Approfondimento 24.6 Scala assoluta dell'entropia.	584
	Approfondimento 24.7 Diavoleto di Maxwell	585

Appendice A Numeri complessi

A.1	Introduzione.	587
A.2	Definizione	588
A.3	Interpretazione geometrica.	589
A.4	Formula di Eulero	590
A.5	Vettori rotanti: i fasori	591

Appendice B Sistemi termodinamici complessi

B.1	Equilibrio meccanico.	593
B.2	Equilibrio termico	596
	Approfondimento B.1 Scala temporale degli scambi energetici.	596
B.3	Equilibrio chimico	597
	Approfondimento B.2 Natura e scala dimensionale degli scambi energetici	598
B.4	Stato di equilibrio termodinamico	601
	Approfondimento B.3 Sistemi soggetti a stati di equilibrio meccanico non isotropi	601
B.5	Sistemi contenenti più di una fase	602
	Approfondimento B.4 Il diagramma di stato, gli stati dell'acqua e la regola delle fasi di Gibbs	602

Appendice C Generalizzazione del primo Principio della Termodinamica e modello microscopico del sistema termodinamico

609

Appendice D Energia potenziale macroscopica ed energia totale di un sistema termodinamico

619

Indice analitico	625
----------------------------	-----

Dinamica del punto

Sommario

- 5.1** Introduzione
- 5.2** Principio di inerzia e sistemi inerziali
- 5.3** La massa
- 5.4** Il secondo Principio della Dinamica
- 5.5** Il terzo Principio della Dinamica
- 5.6** Quantità di moto e sua conservazione
- 5.7** Impulso di una forza

5.1 Introduzione

La Dinamica è quella parte della Meccanica che si occupa di studiare il moto dei corpi partendo dalle cause che lo determinano. Diversamente da quanto visto nella Cinematica, dove avevamo soffermato la nostra attenzione sulla descrizione del moto di un solo corpo, approssimato con un punto geometrico, nella Dinamica risulta fondamentale la cosiddetta *interazione* fra il corpo, di cui vogliamo studiare il moto, e l'*ambiente*, in cui il corpo è immerso. Nel tentativo di dare una definizione di ambiente, possiamo pensare a quest'ultimo come all'insieme di tutti gli altri corpi che circondano il corpo in esame. In realtà la definizione di ambiente è più complessa e comprende, oltre ai corpi, anche i cosiddetti *campi* (ad esempio quello elettromagnetico) che possono influenzare il moto del corpo. In ogni caso, è nelle interazioni tra il corpo in esame e l'ambiente che lo circonda che vanno ricercate le cause che ne determinano il moto o, meglio, la variazione del suo stato di moto.

In un qualsiasi fenomeno naturale che si vuole descrivere, un corpo è sempre immerso in un ambiente con il quale interagisce. Per capire meglio il concetto di interazione possiamo pensare che il corpo *senta* la presenza dell'ambiente circostante che influenza in modo più o meno marcato ciò che gli accade (nel senso che, in generale, le cose per il corpo andrebbero diversamente se l'ambiente fosse diverso). È naturale poi pensare che non tutto ciò che si trova nell'ambiente influenzi allo stesso modo il corpo: alcuni elementi avranno un'influenza rilevante, mentre altri avranno un'influenza molto ridotta, al punto che la loro presenza potrà essere a tutti gli effetti trascurata. Da questo punto di vista, sia la natura dell'interazione tra i vari elementi che costituiscono l'ambiente e il corpo (che in generale può essere diversa), che altri fattori (come la distanza dal corpo) sono parametri sicuramente importanti.

Nonostante la moltitudine di fenomeni naturali che coinvolgono l'interazione di moltissimi corpi, a livello fondamentale nella Fisica moderna sono state individuate solo quattro interazioni, alle quali possono essere ricondotte tutte le altre (si veda **Approfondimento**

5.1). Attualmente i fisici teorici stanno lavorando per una descrizione ancor più unitaria, che preveda un numero ancora inferiore di *interazioni fondamentali*.



Approfondimento 5.1 Le interazioni fondamentali

In natura sono state individuate quattro interazioni fondamentali, che sono alla base di tutte le interazioni tra le particelle fondamentali che costituiscono l'Universo: l'interazione gravitazionale, l'interazione elettromagnetica, l'interazione nucleare forte e l'interazione nucleare debole. Tali interazioni sono caratterizzate da due parametri principali: l'intensità e il raggio d'azione. La tabella ne riporta l'ordine di grandezza nel caso di interazione tra due protoni a contatto.

Interazione	Intensità relativa	Raggio d'azione
nucleare forte	10^{38}	10^{-15} m
elettromagnetica	10^{36}	∞
nucleare debole	10^{31}	10^{-18} m
gravitazionale	1	∞

Nella loro continua ricerca di una descrizione della natura sempre più generale e unitaria, i fisici hanno lavorato e stanno tuttora lavorando con lo scopo di ridurre ulteriormente il numero di interazioni fondamentali, in uno sforzo, sia teorico che sperimentale, che viene detto di "unificazione delle forze". Il primo importante passo in tal senso è stato compiuto nel XIX secolo, quando il fisico James Clerk Maxwell (1831-1879) per la prima volta ha dimostrato che l'interazione elettrica e l'interazione magnetica, apparentemente diverse, sono in realtà manifestazioni di una stessa interazione fondamentale. Maxwell è riuscito a sviluppare una teoria, basata sulla formulazione di quattro equazioni note oggi come equazioni di Maxwell, che descrive in maniera completa tutti i fenomeni elettrici e magnetici, dall'attrazione tra due cariche elettriche, all'attrazione fra due calamite, fino alla propagazione della luce nello spazio. Ha quindi introdotto la cosiddetta *interazione elettromagnetica*.

Nel XX secolo il cammino di unificazione delle forze è proseguito con la formulazione della teoria dell'*interazione elettro-debole*, di cui l'interazione elettromagnetica e quella nucleare debole sono due aspetti. Questo ulteriore sviluppo è stato possibile anche grazie alle scoperte del fisico italiano Carlo Rubbia (insignito del Premio Nobel per la Fisica nel 1984).

Attualmente si sta lavorando all'unificazione dell'interazione elettro-debole con quella nucleare forte. In particolare, è stata sviluppata la teoria nota come Modello Standard, che descrive in modo unificato le due interazioni e che sta ottenendo numerose verifiche sperimentali, tra cui, nel 2012, quella dell'esistenza del bosone di Higgs, grazie all'utilizzo degli acceleratori. Il grande obiettivo della fisica teorica contemporanea, comunque, rimane quello di integrare l'interazione gravitazionale con le altre, cioè integrare la teoria della Relatività Generale con il Modello Standard, nella cosiddetta teoria del Tutto, come già ipotizzato da Albert Einstein (1879-1955).

In generale, le moderne teorie di unificazione delle forze si basano sul presupposto che, in condizioni di energia molto elevata delle particelle interagenti, esista un'unica interazione fondamentale, di cui le quattro interazioni conosciute oggi non siano che aspetti diversi, che compaiono a bassi livelli energetici. Gli alti livelli di energia di cui stiamo parlando sono quelli che si pensa caratterizzassero i primissimi istanti dell'Universo, meno di 10^{-43} secondi dopo il "Big Bang". Oggi si cerca di riprodurre quelle condizioni di altissima energia mediante la costruzione di acceleratori di particelle sempre più potenti, al fine di dare un supporto sperimentale allo sviluppo delle teorie di unificazione.

In Fisica, la grandezza utilizzata per descrivere l'interazione fra un corpo e il suo ambiente (cioè tutto ciò che lo circonda) è la *forza*. Il nome deriva dall'idea di *sforzo* che si compie quando si agisce su un corpo, ad esempio per spostarlo. Da un punto di vista più macroscopico e meno fondamentale, le forze si possono dividere in *forze a distanza* e *forze a contatto*. Nel secondo caso, l'interazione tra corpi, descritta dalle forze, è presente solo se i corpi sono effettivamente a contatto. Nel primo caso, invece, i corpi interagiscono anche se non sono a diretto contatto, ma le caratteristiche dell'interazione in generale dipendono dalla distanza. Inoltre, quando su un corpo viene esercitata una forza, si possono osservare (anche contemporaneamente) due effetti principali: il corpo modifica il proprio stato di moto oppure si deforma.

La forza è una grandezza fisica con caratteristiche direzionali e quindi segue l'algebra dei vettori. In particolare, la forza è il primo esempio che incontriamo di vettore applicato (si veda Paragrafo 2.1.1). Inoltre, per le forze vale il **Principio di sovrapposizione degli effetti**:

Quando un corpo interagisce con l'ambiente, la forza che viene esercitata su di esso è data dalla risultante delle forze esercitate dai diversi elementi dell'ambiente, presi singolarmente.

Da questo Principio possiamo trarre due conseguenze importanti. La prima è che le forze che agiscono su un corpo non si influenzano a vicenda. Ad esempio, l'attrazione gravitazionale che il Sole esercita sulla Terra non è influenzata dall'attrazione che la Luna esercita sulla Terra. Per questo motivo, il Principio è noto anche come **Principio di indipendenza delle azioni simultanee**.

La seconda conseguenza è che il moto del corpo è determinato esclusivamente dalla forza risultante e non dipende dalle singole forze che contribuiscono ad essa.

Concludiamo dando la seguente definizione relativa al concetto di forza:

*Si definisce **corpo libero** un corpo sul quale non agisce alcuna forza.*

La realizzazione sperimentale di questa situazione, molto importante da un punto di vista concettuale, presenta notevoli difficoltà, in quanto risulta molto complicato annullare ogni interazione fra il corpo che si vuole studiare e l'ambiente circostante. Possiamo però sfruttare il Principio di sovrapposizione degli effetti, secondo il quale, infatti, se sul corpo agiscono più forze la cui risultante sia nulla, a tutti gli effetti è come se il corpo fosse libero. Quest'ultima situazione, sebbene anch'essa di non semplice realizzazione, presenta minori difficoltà sperimentali della precedente.



Approfondimento 5.2 Il dinamometro

In questo capitolo e nel successivo preciseremo il concetto di forza, fornendo molti esempi concreti. Vogliamo qui cominciare a familiarizzare con questa grandezza fisica, dando al tempo stesso un metodo per misurarla mediante il **dinamometro**. Nella sua forma più semplice esso è costituito da una molla che ha un estremo fissato in un punto, mentre l'altro è libero (**Figura 5.1**). Quando all'estremo libero della molla viene applicata una forza, si osserva che la molla si deforma, ad esempio si allunga di un certo tratto. Supponiamo che un indicatore sia solidale con l'estremo libero, al quale applichiamo in sequenza una *forza campione* \vec{F}_{camp} , presa come unità di misura, e suoi multipli. Se registriamo le posizioni che l'indicatore via via assume, possiamo costruire una scala graduata per il modulo delle forze. In questo modo, abbiamo effettuato la **taratura** del dinamome-

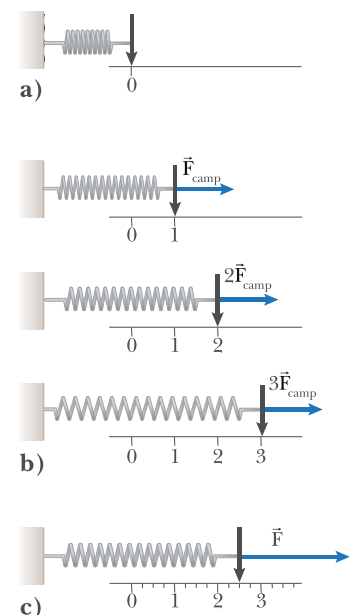


Figura 5.1 Esempio di dinamometro. **a)** A partire da una molla in condizioni di riposo, **b)** si costruisce una scala graduata mediante l'applicazione di una forza campione \vec{F}_{camp} e dei suoi multipli interi. **c)** A questo punto è possibile misurare l'intensità di una forza incognita \vec{F} : in particolare nell'esempio risulta $F = 2.5 F_{\text{camp}}$.

tro. Per misurare il modulo incognito di una forza \vec{F} basta ora orientare l'asse del dinamometro parallelo alla forza, applicarla al suo estremo libero e ricavarne il valore leggendo la posizione dell'indicatore sulla scala graduata costruita in precedenza. Il metodo appena descritto si basa sulla proporzionalità tra forza e allungamento della molla, come descritto nel Paragrafo 7.2.1.

5.2 Principio di inerzia e sistemi inerziali

Incominciamo qui a introdurre i cosiddetti **Principi della Dinamica** chiamati anche *Principi di Newton* in onore dello scienziato britannico Isaac Newton (1643-1727), che per primo li enunciò chiaramente nell'opera *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687). In Fisica, un *principio* enuncia, sulla base di un elevato numero di osservazioni sperimentali, una proprietà molto generale della natura, caratteristica di numerosi fenomeni anche considerevolmente diversi fra loro. Di un principio si dà una dimostrazione indiretta, basata sulla verifica sperimentale delle sue conseguenze. A rigore, quindi, un principio non viene dimostrato, ma è assunto come valido, finché non si osserva anche un solo fenomeno che lo contraddice.

I Principi della Dinamica gettano le basi per lo studio quantitativo del moto dei corpi a partire dalle forze che agiscono su di essi e sono alla base della cosiddetta *Fisica Classica*, che studia i fenomeni naturali più vicini all'esperienza umana di tutti i giorni. Se usciamo da questo ambito, volendo studiare ad esempio fenomeni fisici a livello microscopico (atomico o subatomico) ci accorgiamo che i Principi della Fisica Classica non sono più sufficienti: per dare una descrizione coerente di questi fenomeni è stata sviluppata la *Meccanica Quantistica*. Allo stesso modo, volendo descrivere fenomeni in cui i corpi si muovono con velocità prossime a quelle della luce si deve ricorrere alla teoria della *Mechanica Relativistica* (si veda Capitolo 16).

Il **primo Principio della Dinamica** considera la situazione più semplice che si possa pensare, cioè quella di un corpo libero. Come detto, tale situazione può essere approssimata andando a considerare un corpo sufficientemente lontano da ogni altro corpo, in modo che qualsiasi interazione possa essere trascurata. Dato che la descrizione del moto di un corpo dipende dal sistema di riferimento scelto, osservatori solidali con sistemi di riferimento diversi vedranno il corpo libero muoversi in modo differente (ad esempio, moto rettilineo o curvilineo, uniforme o accelerato, ecc.). L'osservatore che vede il corpo muoversi di moto rettilineo uniforme o restare fermo, cioè osserva una velocità costante (diversa da o uguale a zero), è solidale con un sistema di riferimento detto **sistema di riferimento inerziale**. Il primo Principio della Dinamica, detto anche **Principio d'inerzia**, costituisce quindi la definizione di sistema di riferimento inerziale e ne sancisce l'esistenza. Esso può essere enunciato come segue:

In un sistema di riferimento inerziale, un corpo libero mantiene il suo stato di moto (ossia mantiene velocità costante), cioè rimane in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme.

Il primo Principio in pratica dice che, se non intervengono cause esterne, il corpo permane nel suo stato di moto rettilineo uniforme o di quiete. Esso, quindi, introduce l'**inerzia** che i corpi mostrano nel variare il loro stato di moto (cioè la loro velocità vettoriale) come concetto fondamentale per la Dinamica.

È opportuno ora fare alcune considerazioni. Prima di tutto notiamo che, per la legge di composizione delle velocità (si veda Paragrafo 9.2), è immediato verificare che, *se esiste un sistema di riferimento inerziale, allora ne esistono infiniti*. Infatti in qualsiasi sistema di riferimento che si muove di moto rettilineo uni-

forme rispetto a un sistema di riferimento inerziale la velocità di un corpo libero risulta costante. Esiste dunque una *classe* di sistemi di riferimento inerziali, gli uni in moto rettilineo uniforme rispetto agli altri. Il Principio d'inerzia è il fatto che esistessero più sistemi di riferimento inerziali in relazione tra loro era già stato intuito dallo scienziato italiano Galileo Galilei (1564-1642) nel suo libro *Dialogo sopra i Due Massimi Sistemi del Mondo* (1632) di cui riportiamo un passo tratto dalla *Giornata Seconda*: “... *Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso; e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso si farà un poco di fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nugoletta trattenervisi, e indifferentemente muoversi non più verso questa che quella parte...*”.

Il concetto di sistema di riferimento inerziale che il primo Principio introduce è un concetto limite: ci si avvicina a tale sistema di riferimento considerando scale sempre più grandi. In molti casi un laboratorio rappresenta una buona approssimazione di sistema di riferimento inerziale e in esso si può verificare la validità dei Principi della Meccanica. Quando però si vuole studiare con maggior accuratezza il moto dei corpi, si deve tener conto del moto rotatorio della Terra attorno al proprio asse e, contemporaneamente, il moto di rivoluzione attorno al Sole: allora una migliore approssimazione di sistema di riferimento inerziale è un sistema di riferimento centrato sul Sole, con gli assi diretti verso le cosiddette *stelle fisse*. Con questo nome nell'antichità si indicavano quei corpi celesti che sembravano avere posizioni fisse sulla sfera celeste. In realtà a partire dal XVIII secolo, mediante osservazioni astronomiche più precise, ci si accorse di un loro moto, seppur minimo. La quasi fissità di questi corpi celesti è dovuta al fatto che essi si trovano a grandissima distanza dalla Terra. Questo sistema di riferimento è adatto, ad esempio, per studiare il moto dei corpi all'interno del sistema solare. A questo punto, però, si può notare che anche il Sole si muove all'interno della Via Lattea e che quest'ultima a sua volta si muove all'interno dell'ammasso locale di galassie di cui fa parte. Si capisce quindi che ci si avvicina sempre di più a un sistema inerziale andando su scale sempre più grandi. Ribadiamo, comunque, che in molti casi un sistema di riferimento solidale con il laboratorio in cui si conducono gli esperimenti è un'approssimazione sufficientemente accurata di sistema di riferimento inerziale.

Inoltre, per il Principio di sovrapposizione degli effetti, il Principio d'inerzia vale anche se il corpo è soggetto a più forze la cui risultante sia nulla. Come già detto (si veda Paragrafo 5.1), questa condizione è più facile da realizzare sperimentalmente e permette di avere un'idea concreta della validità del Principio di inerzia: si pensi ad esempio al moto rettilineo uniforme che viene mantenuto per un certo intervallo di tempo dal dischetto da hockey su ghiaccio quando viene lanciato (**Figura 5.2**), oppure alla versione da sala giochi (*hockey da tavolo*), dove un dischetto di plastica si muove su un piano con attrito ridotto tramite un cuscinetto d'aria: se ci si limita a considerare il moto nell'intervallo di tempo di qualche secondo e nella regione di spazio di qualche metro, entrambi i casi rappresentano una buona approssimazione di corpo sul quale agiscono forze che hanno risultante nulla.

Dal passo di Galileo riportato sopra, risulta evidente che gli effetti descritti non permettono di determinare se la nave sia ferma o in moto rispetto al molo, né la sua eventuale velocità, a condizione che il moto della nave sia rettilineo uniforme (rispetto al molo). In altre parole, i sistemi di riferimento solidali con la nave e con il molo sono *equivalenti*, cioè la descrizione di fenomeni fisici avviene nello stesso modo e conduce alle stesse conclusioni rispetto a entrambi. Questa considerazione è di validità del tutto generale e viene espressa dal **Principio di Relatività galileiana**:

Le leggi fisiche assumono la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

Da ora in avanti, se non specificato diversamente, la formulazione delle leggi fisiche avrà validità rispetto a un sistema di riferimento inerziale. È possibile studiare i fenomeni naturali e formulare le corrispondenti leggi fisiche anche quando si consideri un sistema di riferimento non inerziale. In un tale sistema di riferimento, però, il Principio d'inerzia non vale e la formulazione delle altre leggi dovrà essere opportunamente modificata.

Gli antichi filosofi avevano individuato nello stato di quiete la condizione di moto più semplice di un corpo, ritenevano cioè che un corpo non soggetto a forze restasse in quiete. Il Principio d'inerzia sancisce invece che lo stato di moto più fondamentale, che si osserva quando un corpo non è soggetto ad alcuna interazione, è il moto rettilineo uniforme (del quale lo stato di quiete è un caso particolare).

In realtà, in base all'osservazione del moto dei corpi che ci circondano, la conclusione degli antichi filosofi sembra logica: se immaginiamo di perturbare il meno possibile un corpo che si muove, questo, dopo un tempo sufficientemente lungo, cessa di muoversi e rimane in quiete. Oggi si sa che ciò è dovuto al fenomeno dell'attrito. Però, proprio perché l'attrito si manifesta praticamente in tutti i fenomeni naturali, la comprensione e la successiva formulazione del Principio d'inerzia da parte degli scienziati del XVII secolo ha comportato un'operazione di astrazione non banale rispetto a un'osservazione più diretta e superficiale di ciò che ci circonda.



Figura 5.2 Rispetto al campo di gioco, il dischetto lanciato da un giocatore di hockey su ghiaccio si muove con buona approssimazione di moto rettilineo uniforme.

5.3 La massa

In questo paragrafo introduciamo un concetto fondamentale per la descrizione dinamica del moto: la *massa* dei corpi. Consideriamo due corpi A e B liberi di muoversi su un piano orizzontale che individua un sistema di riferimento inerziale. Praticamente ciò si ottiene facendo in modo che l'attrito tra il piano e i corpi sia trascurabile (si pensi all'esempio del dischetto che scivola sul campo da hockey su ghiaccio). Appoggiamo quindi i due corpi agli estremi di una molla orizzontale tenuta compressa da un filo e assumiamo che inizialmente il sistema sia fermo rispetto al piano (**Figura 5.3**). Se ora tagliamo il filo, la molla si allunga, sospingendo i corpi: questi, una volta staccatisi dalla molla, si muovono lungo la stessa direzione, ma con versi opposti, di moto rettilineo uniforme, in accordo con il Principio d'inerzia.

Misurando i moduli v_A e v_B delle velocità dei due corpi in diverse condizioni, cambiando cioè il grado di compressione della molla oppure utilizzando molle diverse, si nota che in generale v_A e v_B cambiano, ma il loro rapporto rimane costante. Se in più si conduce lo stesso esperimento considerando un terzo corpo C, da misure incrociate dei rapporti delle velocità, risulta possibile associare a ogni corpo una grandezza m che chiameremo **massa inerziale** o, più semplicemente, **massa** del corpo, che gode della seguente proprietà: il rapporto tra v_A e v_B è legato al rapporto tra le masse degli stessi corpi A e B dalla seguente relazione (si veda **Approfondimento 5.3**):

$$(5.1) \quad \frac{v_B}{v_A} = \frac{m_A}{m_B}.$$

Le velocità acquisite dai corpi dopo aver subito la spinta da parte della molla risultano quindi inversamente proporzionali alle loro masse: tanto maggiore sarà la massa di uno dei due corpi, tanto minore sarà la sua velocità. Si capisce quindi perché la massa viene indicata come inerziale: essa infatti *dà una misura dell'inerzia con cui il corpo si oppone alla variazione del suo stato di moto* (cioè, se è inizialmente fermo, si oppone a mettersi in moto, acquisendo una certa velocità).

Nell'esempio precedente abbiamo assunto per semplicità che i due corpi appoggiati alla molla fossero inizialmente fermi rispetto al piano. Se, più in generale, i due corpi hanno velocità iniziale v_0 non nulla, l'Eq. 5.1 diventa:

$$(5.2) \quad \frac{v_B - v_0}{v_A - v_0} = \frac{\Delta v_B}{\Delta v_A} = \frac{m_A}{m_B},$$

ma le considerazioni fatte riguardo alle proprietà della massa inerziale rimangono inalterate.

La massa di un corpo è una *grandezza scalare additiva*. Infatti, se un corpo A è formato da due corpi B e C, si verifica che:

$$(5.3) \quad m_A = m_B + m_C.$$

Nel Sistema Internazionale la massa è una grandezza fisica fondamentale e la sua unità di misura è il *chilogrammo* (kg) (si veda Capitolo 1).

Facciamo, infine, notare come l'esperimento sopra descritto, fornendo una procedura concreta per misurare la massa dei corpi, rappresenti la definizione operativa della massa. Dette \vec{v} e \vec{v}_{camp} rispettivamente le velocità del corpo di cui si vuole determinare la massa m e di un corpo-campione la cui massa m_{camp} viene presa come unità di misura, si pone:

$$(5.4) \quad m = \frac{v_{camp}}{v} m_{camp}.$$

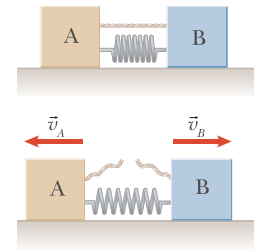


Figura 5.3 (a) La molla è tenuta compressa da un filo; (b) dopo il taglio del filo, la molla si allunga e spinge i due corpi, che, una volta staccatisi dalla molla, si allontanano con moto rettilineo uniforme.

Vedremo che esistono altri metodi, più semplici del metodo dinamico riportato sopra, per misurare la massa di un corpo.



Approfondimento 5.3 La massa inerziale

Vogliamo qui dimostrare come si possa individuare una grandezza scalare positiva caratteristica di ogni corpo, che chiameremo massa inerziale. Si immagini di effettuare misure delle velocità \vec{v}_A e \vec{v}_B di due corpi A e B inizialmente fermi, sospinti da una molla in estensione, come riportato in **Figura 5.3**.

Eseguendo la misura in diverse condizioni (ad esempio cambiando la compressione della molla oppure utilizzando molle di diverse dimensioni o diverso materiale), si osserva che il rapporto dei moduli v_A e v_B delle velocità risulta indipendente dalle condizioni in cui viene svolto l'esperimento. Possiamo allora definire una funzione scalare f :

$$f(A, B) = \frac{v_B}{v_A},$$

che dipende solo dai corpi A e B utilizzati per l'esperimento. A ciascuna coppia di corpi, la funzione f associa dunque un numero positivo. È immediato verificare che tale funzione gode della seguente proprietà:

$$f(B, A) = \frac{1}{f(A, B)}.$$

Infatti:

$$f(B, A) = \frac{v_A}{v_B} = \frac{1}{v_B/v_A} = \frac{1}{f(A, B)}.$$

Se ora si considera un terzo corpo C e si esegue lo stesso esperimento tra le tre possibili combinazioni dei corpi, si evidenzia una nuova proprietà della funzione f : i valori di f ottenuti svolgendo i tre esperimenti soddisfanno la relazione:

$$f(A, B) = \frac{f(C, B)}{f(C, A)},$$

dove $f(C, B) = \frac{v_B}{v_C}$ e $f(C, A) = \frac{v_A}{v_C}$.

Allora il rapporto $\frac{f(C, B)}{f(C, A)}$ non dipende dal corpo C. Quindi la dipendenza dai due corpi nella funzione f si deve poter fattorizzare, cioè la funzione f deve assumere una forma del tipo:

$$f(A, B) = g(A)h(B),$$

dove g e h sono funzioni scalari positive di un solo corpo. Sostituendo quest'ultima relazione nella precedente, si ottiene:

$$g(A)h(B) = \frac{g(C)h(B)}{g(C)h(A)}, \quad \Rightarrow \quad g(A) = \frac{1}{h(A)}.$$

In definitiva, si dimostra che:

$$f(A, B) = \frac{g(A)}{g(B)}.$$

Tramite l'esperimento sopra descritto, abbiamo quindi individuato una funzione scalare g , che permette di associare a ogni corpo una grandezza positiva: la funzione g rappresenta la *massa inerziale* del corpo, che solitamente viene indicata con la lettera m :

$$g(A) = m_A.$$

Quindi:

$$f(A, B) = \frac{m_A}{m_B},$$

in accordo con l'Eq. 5.1.

5.4 Il secondo Principio della Dinamica

Nel Paragrafo 5.2 abbiamo descritto il moto di un corpo libero o soggetto a più forze la cui risultante sia nulla. Vediamo ora cosa succede quando sul corpo agisce una forza non nulla. In questo caso, sempre rispetto a un sistema di riferimento inerziale, si osserva che il moto del corpo non è più rettilineo uniforme, ma la sua velocità varia con il tempo: il corpo cioè accelera. Il **secondo Principio della Dinamica** stabilisce il legame tra la forza applicata al corpo e la sua accelerazione, definendo in termini quantitativi la forza che descrive l'interazione stessa:

In un sistema di riferimento inerziale, un corpo puntiforme soggetto a forze di risultante \vec{F} ha accelerazione \vec{a} proporzionale a \vec{F} . La costante di proporzionalità è data dalla massa inerziale m del corpo, vale cioè la legge:

$$(5.5) \quad \vec{F} = m\vec{a}.$$

La relazione tra forza e accelerazione vale istante per istante durante il moto del corpo ed è una relazione vettoriale. In particolare, essa ci dice che, poiché la massa è una grandezza scalare e positiva, forza e accelerazione sono due vettori che hanno la stessa direzione e lo stesso verso. Si può anche vedere che il secondo Principio è coerente con il primo: infatti, se il corpo è libero, la forza agente su di esso è nulla e quindi per l'Eq. 5.5 risulta nulla anche la sua accelerazione. Allora la velocità del corpo non varia nel tempo (cioè è costante) ed esso persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, come prevede il primo Principio (ricordiamo che siamo in un sistema di riferimento inerziale). Inoltre, notiamo che il secondo Principio può essere interpretato anche al contrario: ogni volta che un corpo si muove di moto accelerato in un sistema di riferimento inerziale, la risultante \vec{F} delle forze che agiscono su di esso è data dall'Eq. 5.5.

Il secondo Principio mostra, infine, come la massa inerziale sia quella proprietà dei corpi che descrive come essi variano il proprio stato di moto quando sono soggetti a una forza. In particolare, a parità di forza agente, l'accelerazione di un corpo di massa più piccola avrà modulo maggiore di quella di un corpo di massa più grande. Questo è lo stesso concetto che abbiamo già espresso nel paragrafo precedente introducendo il concetto di massa inerziale. Riprendiamo l'esempio descritto in **Figura 5.3**: nell'intervallo di tempo Δt , che va dall'istante in cui si taglia il filo all'istante in cui i due corpi si staccano dalla molla, istante per istante, sui corpi agiscono forze della medesima intensità. Allora dall'Eq. 5.2 possiamo ricavare:

$$(5.6) \quad \frac{m_A}{m_B} = \frac{\Delta v_B}{\Delta v_A} = \frac{\Delta v_B}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta v_A} = \frac{a_B}{a_A} \Rightarrow \frac{a_B}{a_A} = \frac{m_A}{m_B},$$

dove a_A e a_B sono le accelerazioni medie dei due corpi nell'intervallo di tempo Δt . Quindi, a parità di forza agente sui due corpi, le accelerazioni sono inversamente proporzionali alle masse inerziali, in accordo con il secondo Principio della Dinamica.

Nel Sistema Internazionale la grandezza fisica forza è una grandezza derivata, le cui dimensioni sono date da:

$$(5.7) \quad [F] = [M][a] = [M][L][T]^{-2}.$$

L'unità di misura della forza è quindi kg m s^{-2} , che prende il nome di newton (simbolo N) in onore del fisico britannico. Diremo che un corpo di massa pari a 1 kg su cui agisce una forza di modulo pari a 1 N si muove con un'accelerazione di 1 m s^{-2} in un sistema di riferimento inerziale.

Esempio 5.1 Calcolo delle forze

La velocità di un punto materiale di massa $m = 1.5 \text{ kg}$ passa dal valore $\vec{v}_1 = 2\vec{u}_x + \vec{u}_y - 3\vec{u}_z \text{ m s}^{-1}$ all'istante $t_1 = 3 \text{ s}$ al valore $\vec{v}_2 = 6\vec{u}_x - 3\vec{u}_y - 3\vec{u}_z \text{ m s}^{-1}$ all'istante $t_2 = 5 \text{ s}$, rispetto a un sistema di riferimento inerziale.

Cosa possiamo affermare riguardo alle possibili forze agenti sul punto materiale nell'intervallo di tempo considerato?

Soluzione. Passando dall'istante t_1 all'istante t_2 la velocità del punto materiale è cambiata. Questo significa che il punto materiale ha accelerato in questo intervallo di tempo. Poiché il sistema di riferimento considerato è inerziale, dal primo Principio della Dinamica possiamo affermare che sul punto materiale ha agito una forza. Però, abbiamo informazioni sul moto del punto solo ai due istanti di tempo t_1 e t_2 : possiamo quindi ricavare solo l'accelerazione media \vec{a}_m e, quindi, la forza media \vec{F}_m che ha agito sul punto materiale in tale intervallo di tempo:

$$\begin{aligned} \vec{F}_m = m\vec{a}_m &= m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = m \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = 1.5 \frac{(6-2)\vec{u}_x + (-3-1)\vec{u}_y + (-3+3)\vec{u}_z}{5-3} \text{ N} = \\ &= (2\vec{u}_x - 2\vec{u}_y) \text{ N}. \end{aligned}$$

In particolare, l'intensità di tale forza risulta:

$$F_m = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{2^2 + (-2)^2} \text{ N} = 2\sqrt{2} \text{ N}.$$

Per il Principio di sovrapposizione degli effetti \vec{F}_m è la risultante delle forze che in media hanno agito nell'intervallo di tempo $\Delta t = t_2 - t_1$. Dai dati del problema non possiamo, però, dire se questa rappresenta una sola o più interazioni subite dal punto materiale.

5.5 Il terzo Principio della Dinamica

I primi due Principi hanno gettato le basi della Dinamica, fornendo il legame quantitativo tra causa (forza) ed effetto (variazione dello stato di moto, accelerazione) nello studio dei fenomeni di natura meccanica. Il **terzo Principio della Dinamica** stabilisce, invece, una proprietà fondamentale dell'interazione fra

Lamberto Duò • Paola Taroni

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**.

