


Semestre Filtro
2026-2027

Fisica Generale

basato sull'opera di E. Ragozzino

Manuale conforme al **Syllabus**
per il **semestre filtro 2026-2027**

II Edizione



Eddie

l'assistente virtuale
per sintesi e quiz



**APP EXAM
MANAGER**

con migliaia
di quiz di Fisica



Versione **Ebook**


EdiSES
EDIZIONI

Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse

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



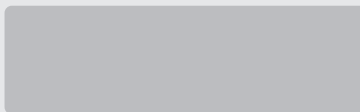
COLLEGATI AL SITO
EDISES.IT

ACCEDI AL
MATERIALE DIDATTICO

SEGUI LE
ISTRUZIONI

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

Se sei registrato al sito

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

Se non sei già registrato al sito

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



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

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

- **Ebook:** versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita BookShelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire. Sono qui fornite in **Appendice E** le soluzioni esplicite ragionate degli esercizi di fine capitolo contrassegnati con un asterisco.
- **Exam Manager:** simulatore da desktop che riproduce le modalità di svolgimento delle prove di esame del semestre filtro (domande a risposta multipla e a completamento, tempi e punteggi previsti) e App da scaricare con migliaia di quiz a risposta multipla per esercitarti dal tuo smartphone.

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



Eddie, l'Assistente virtuale per uno studio su misura

Un percorso guidato, chiaro ed efficace

Eddie, l'Assistente virtuale basato sull'Intelligenza Artificiale, utilizza esclusivamente la **Knowledge base** del manuale per un supporto affidabile e mirato, adattando lo studio ai tuoi tempi e obiettivi



Mappe concettuali



Sintesi dell'argomento



Definizioni chiave



Quiz a risposta multipla



Domande a completamento



Flashcard

**PER ORGANIZZARE,
CAPIRE E RIPASSARE SUBITO**

**PER FISSARE
I CONCETTI IMPORTANTI**

**PER MISURARE I TUOI
PROGRESSI**



Per consultare Eddie, inquadra
il **QR CODE** all'inizio di ogni capitolo



Eddie, l'Assistente virtuale per uno studio su misura

Eddie, l'Assistente virtuale basato sull'Intelligenza Artificiale, è progettato per accompagnarti in ogni fase della preparazione, adattando lo studio ai tuoi tempi, ai tuoi obiettivi e al tuo livello di partenza. Eddie utilizza esclusivamente la **knowledge base del manuale**, capitolo per capitolo, per offrirti un supporto affidabile, coerente e mirato.

Per ogni capitolo puoi:

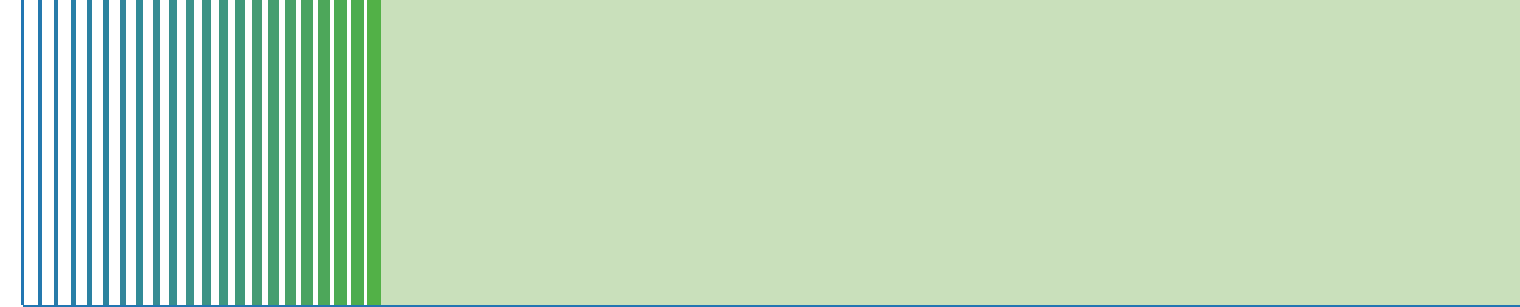
- > **consultare una mappa concettuale**, per organizzare e velocizzare l'apprendimento;
- > **ottenere una sintesi chiara ed efficace**, ideale sia per una prima lettura sia per il ripasso;
- > **verificare la preparazione** con test a risposta multipla, domande a completamento e flashcard, utili per misurare i progressi e individuare eventuali lacune;
- > **consultare le definizioni chiave**, per fissare i concetti fondamentali richiesti nelle prove d'esame.

Eddie ti aiuta innanzitutto a **personalizzare il metodo di studio**, permettendo di scegliere il percorso più adatto alle tue esigenze:

- > **Approccio sequenziale**: lo studio segue rigorosamente l'ordine dei capitoli del manuale. È indicato per chi parte da zero o desidera una preparazione sistematica e completa.
- > **Approccio strategico**: dà priorità agli argomenti con maggiore peso, concentrando l'impegno su quanto è più presumibile costituisca oggetto della prova d'esame.
- > **Approccio diagnostico**: si parte dai quiz per individuare punti di forza e aree di miglioramento. In base ai risultati, lo studio viene orientato verso i capitoli meno consolidati, evitando ripassi inutili e rendendo la preparazione più efficiente.

Nella **fase di perfezionamento finale**, in prossimità della prova d'esame, il **software di simulazione** abbinato al volume consente di svolgere prove complete, individuare i punti critici e concentrare l'attenzione sugli argomenti che richiedono un ultimo intervento di rinforzo.

In questo modo, **Eddie e il software di simulazione** diventano strumenti di orientamento intelligente che non sostituiscono il manuale, ma ne valorizzano i contenuti, aiutandoti a studiare in modo più mirato, consapevole ed efficace.



FISICA GENERALE

basato sull'opera di Ezio Ragozzino

Manuale conforme al Syllabus per il semestre filtro 2026-2027

II edizione

Coordinamento a cura di
Raffaele Velotta

Raffaele Velotta
FISICA GENERALE basato sull'opera di E. Ragozzino - II Edizione
Manuale conforme al Syllabus per il semestre filtro 2026-2027

Copyright © 2026 EdiSES Edizioni S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
2031 2030 2029 2028 2027 2026

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 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:

ProMedia Studio di Antonella Leano – Napoli

Stampato presso:

A.C.M. S.p.A.

Via dei Velaioli 7, Torre del Greco (NA)

per conto della

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

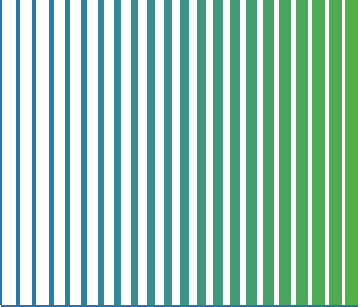
www.edises.it

assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 260 4

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.



AUTORI

ROBERTA ARCIDIACONO

(Capp. 8, 9, 10)

Università degli Studi del Piemonte Orientale

BARTOLOMEO DELLA VENTURA

(Capp. 2, 7)

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

MARTINO GAGLIARDI

(Capp. 16, 17)

Università degli Studi di Torino

ELENA GERACI

(Capp. 11, 12)

Università degli Studi di Catania

GIOVANNI METTIVIER

(Capp. 18, 19, 22)

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

MARCO MICELI

(Capp. 20, 21)

Università degli Studi di Palermo

PIER GIORGIO PRADA MORONI

(Capp. 4, 5, 6)

Università degli Studi di Pisa

SABINA TANGARO

(Capp. 13, 14, 15)

Università degli Studi di Bari

RAFFAELE VELOTTA

(Capp. 1, 3)

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

COORDINATORE

RAFFAELE VELOTTA

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

PREFAZIONE

Quest'opera nasce dalla revisione e dall'ampliamento di *Principi di Fisica* di Ezio Ragozzino ed è stata concepita specificamente per il semestre filtro per l'ammissione ai Corsi di Laurea magistrale a ciclo unico in Medicina e Chirurgia, Odontoiatria e Protesi Dentaria e Medicina Veterinaria. L'obiettivo è quello di offrire agli studenti uno strumento didattico chiaro, accessibile e rigoroso, pienamente aderente al Syllabus di Fisica previsto dal nuovo percorso formativo.

L'introduzione del semestre filtro ha infatti modificato profondamente l'organizzazione dello studio delle discipline di base, richiedendo percorsi formativi uniformi e strumenti didattici capaci di coniugare chiarezza espositiva, rigore scientifico e aderenza puntuale ai contenuti previsti dal Syllabus nazionale. Questa seconda edizione nasce anche dall'esperienza maturata nella prima applicazione della riforma e dall'esigenza di offrire un testo sempre più funzionale alle modalità di studio e di verifica richieste dal nuovo percorso formativo.

Fin dalla prima edizione, il progetto editoriale si è proposto di conservare lo spirito originale e l'impostazione metodologica del testo di Ragozzino: l'uso di un linguaggio semplice ma preciso, l'attenzione alla gradualità nell'introduzione del formalismo matematico e l'organizzazione chiara degli argomenti, finalizzata a privilegiare la comprensione dei fenomeni fisici rispetto a un apprendimento puramente nozionistico.

Questa seconda edizione rappresenta un ulteriore sviluppo di tale impostazione. I contenuti sono stati rivisti e riorganizzati in modo più organico, integrando nel corpo del testo argomenti che nella precedente edizione erano presentati come approfondimenti aggiuntivi. In particolare, le sezioni dedicate alle *Onde meccaniche* e alla *Trasmissione del calore* sono state ampliate e pienamente inserite nel percorso didattico del volume, in conformità a quanto previsto dal Syllabus attuale. Inoltre, i capitoli sono stati articolati in sezioni più concise e omogenee, così da agevolare la consultazione, lo studio e gli eventuali approfondimenti.

Particolare attenzione è stata inoltre dedicata agli strumenti di supporto all'apprendimento. Lungo il testo sono presenti numerosi *esempi svolti*, pensati per guidare lo studente nella risoluzione dei problemi attraverso un approccio graduale e strutturato. Alla fine di ogni capitolo sono state inoltre inserite *domande di verifica*, con l'obiettivo di favorire la riflessione sui concetti fondamentali e consolidare la comprensione degli argomenti trattati.

Ci auguriamo che anche questa nuova edizione possa rappresentare un valido supporto per gli studenti nell'affrontare il percorso del semestre filtro e uno strumento efficace per lo studio della Fisica durante il primo semestre della formazione universitaria.

INDICE GENERALE

Capitolo 1	Grandezze fisiche	1	4.5	Moto rettilineo uniforme	70
1.1	Concetto operativo di grandezza fisica. Grandezze fondamentali e derivate	1	4.6	Moto rettilineo uniformemente accelerato	71
1.2	Sistemi di unità di misura. Multipli e sottomultipli di unità di misura	3	4.7	Moto di caduta libera	73
1.3	Analisi dimensionale	6	4.8	Moto circolare	77
1.4	Misurazione degli angoli. Il radiante	8	4.9	Velocità angolare e accelerazione angolare. Periodo e frequenza	80
1.5	Uso delle potenze positive e negative di 10. Notazione scientifica	9	4.10	Moto armonico	83
	DOMANDE DI VERIFICA	11		DOMANDE DI VERIFICA	85
	ESERCIZI	12		ESERCIZI	85
Capitolo 2	Vettori	15	Capitolo 5	Dinamica del punto materiale	87
2.1	Coordinata di un punto su una retta	15	5.1	Il concetto di forza	87
2.2	Sistemi di coordinate	16	5.2	Sistemi inerziali e prima legge della dinamica di Newton	91
2.3	Grandezze scalari e vettoriali	20	5.3	Il concetto di massa e la seconda legge della dinamica di Newton	93
2.4	Operazioni con i vettori	21	5.4	La forza peso e l'accelerazione di gravità. La legge della gravitazione universale	95
	DOMANDE DI VERIFICA	27	5.5	La terza legge della dinamica di Newton: il principio di azione e reazione	97
	ESERCIZI	28	5.6	Suggerimenti pratici per studiare il moto	99
Capitolo 3	Cinematica in una dimensione	29	5.7	Forze di contatto	100
3.1	La velocità e l'accelerazione come grandezze scalari	29	5.8	Oscillatore armonico	112
3.2	Analisi del moto. Dipendenza funzionale e rappresentazione grafica. Tabelle e diagrammi. Pendenza di una curva. Rapidità di variazione di una grandezza	35	5.9	Moti curvilinei	114
3.3	Moto uniforme e moto uniformemente vario	45	5.10	Quantità di moto, impulso e seconda legge della dinamica	120
	DOMANDE DI VERIFICA	52		DOMANDE DI VERIFICA	123
	ESERCIZI	52		ESERCIZI	123
Capitolo 4	Cinematica in tre dimensioni	57	Capitolo 6	Dinamica dei sistemi	129
4.1	Posizione, curva oraria e traiettoria	58	6.1	Sistema a due corpi isolato	129
4.2	Spostamento	60	6.2	Urto tra due corpi	131
4.3	Velocità	62	6.3	Sistemi a molti corpi e centro di massa	136
4.4	Accelerazione	64	6.4	Corpo rigido	141
			6.5	Definizione e condizione di equilibrio di una leva. Vari tipi di leve nel corpo umano	148
			6.6	Elasticità dei materiali	152

6.7 Elementi di dinamica rotazionale	154
DOMANDE DI VERIFICA	162
ESERCIZI	162

Capitolo 7 Lavoro ed energia 167

7.1 Lavoro di una forza	167
7.2 Il teorema dell'energia cinetica	170
7.3 Il concetto di energia	172
7.4 Forze conservative	174
7.5 Energia potenziale	178
7.6 Sistemi meccanici conservativi. L'energia meccanica dei sistemi reali. Considerazioni conclusive sull'energia e sul lavoro	180
7.7 Potenza	185
7.8 Lavoro fisiologico e lavoro in senso fisico	186
DOMANDE DI VERIFICA	187
ESERCIZI	188

Capitolo 8 Liquidi 193

8.1 Definizione e unità di misura della pressione	193
8.2 Densità e peso specifico	194
8.3 Definizione di fluido. Liquidi e gas. Forze agenti su di un volume di fluido in quiete	196
8.4 Legge di Stevino. Equilibrio di liquidi in vasi fra loro comunicanti. Manometri ad aria libera. Pressione normale. Barometro di Fortin	198
8.5 Legge di Pascal. Pressa idraulica	205
8.6 Legge di Archimede. Equilibrio dei galleggianti. Applicazioni della legge di Archimede	207
8.7 Fluidi ideali. Moto stazionario e costanza della portata	212
8.8 Teorema di Bernoulli	214
DOMANDE DI VERIFICA	220
ESERCIZI	221

Capitolo 9 Viscosità nei liquidi reali 227

9.1 L'attrito interno dei liquidi reali. Moto laminare e coefficiente di viscosità	227
9.2 Liquidi reali e teorema di Bernoulli. Perdita di carico. Regime di Poiseuille e legge di Hagen-Poiseuille	230

9.3 Resistenza viscosa. Processo di sedimentazione. Eritrosedimentazione	233
9.4 Centrifugazione	234
9.5 Regime laminare e regime vorticoso. Numero di Reynolds	237
9.6 La circolazione sanguigna. Pressione arteriosa e lavoro del cuore	238
DOMANDE DI VERIFICA	245
ESERCIZI	245

Capitolo 10 Fenomeni di superficie nei liquidi 247

10.1 Le forze di coesione. Raggio d'azione molecolare e forze di richiamo	247
10.2 Contrattilità delle superfici liquide. Tensione superficiale. Formazione di lamine sottili	248
10.3 Tensione delle superfici curve. Legge di Laplace	252
10.4 Fenomeni capillari. Legge di Jurin	254
10.5 Contagocce	256
10.6 Embolia gassosa	257
DOMANDE DI VERIFICA	258
ESERCIZI	258

Capitolo 11 Onde meccaniche. Sovrapposizione e onde stazionarie 261

11.1 Propagazione di una perturbazione	262
11.2 Modello sinusoidale di un'onda che si propaga	263
11.3 La velocità delle onde trasversali nelle corde	268
11.4 Riflessione e trasmissione delle onde	269
11.5 Potenza trasmessa dalle onde sinusoidali nelle corde	271
11.6 Onde acustiche	273
11.7 L'effetto Doppler	277
11.8 Interferenza tra onde	281
11.9 Onde stazionarie	285
11.10 Battimenti: interferenza temporale	288
11.11 L'orecchio umano	290
11.12 Caratteri distintivi e classificazione dei suoni	291
11.13 Misurazione dell'intensità sonora in decibel	293

11.14 Applicazioni tecniche ed effetti biologici degli ultrasuoni	295	14.3 Espressione della quantità di calore scambiata da un corpo. Calore molare. Calore specifico a pressione costante e a volume costante	351
11.15 Gli ultrasuoni in diagnostica e terapia medica	298	14.4 Energia interna di un sistema termodinamico. Primo principio della termodinamica	352
DOMANDE DI VERIFICA	301	14.5 Stato di equilibrio di un sistema. Trasformazioni reversibili e irreversibili	358
ESERCIZI	302	14.6 Lavoro termodinamico	359
 Capitolo 12 Diffusione	305	14.7 Relazione di Mayer. Calori molari del gas perfetto	361
12.1 L'agitazione termica nei liquidi e nei gas. Moti browniani	305	14.8 Trasformazioni isoterme, adiabatiche e cicliche	366
12.2 Diffusione molecolare. Legge di Fick e coefficiente di diffusione	307	14.9 Cambiamenti di stato	370
12.3 I fenomeni osmotici. Membrane permeabili e semipermeabili	312	14.10 Calorimetro ad acqua	371
12.4 Pressione osmotica	314	14.11 Potenza metabolica. Valore energetico degli alimenti	372
12.5 Leggi di van't Hoff	314	14.12 La struttura dell'acqua	374
DOMANDE DI VERIFICA	319	DOMANDE DI VERIFICA	376
ESERCIZI	320	ESERCIZI	376
 Capitolo 13 Gas e teoria cinetica	321	 Capitolo 15 Secondo principio della termodinamica	381
13.1 La temperatura: definizione, misurazione e scale termometriche	321	15.1 Macchine termiche e refrigeranti. Secondo principio della termodinamica	381
13.2 Le leggi dello stato gassoso ideale: legge di Boyle-Mariotte e leggi di Gay-Lussac	324	15.2 Macchine termiche. Enunciati di Kelvin-Planck e di Clausius. Teorema di Carnot e rendimento massimo	382
13.3 L'equazione di stato dei gas perfetti. Scala assoluta delle temperature	326	15.3 L'entropia	388
13.4 Teoria cinetica e definizione microscopica di gas perfetto	330	DOMANDE DI VERIFICA	394
13.5 Il comportamento dei gas reali. Equazione di van der Waals. Temperatura critica	334	ESERCIZI	394
13.6 Vapore saturo e tensione massima di vapore. Modi di ottenere la condensazione di un vapore. Umidità relativa	337	 Capitolo 16 Fenomeni elettrici	397
DOMANDE DI VERIFICA	339	16.1 L'origine atomica dell'elettricità. Elettrizzazione per strofinio	397
ESERCIZI	340	16.2 Elettrizzazione per contatto e per induzione. Isolanti e conduttori	399
 Capitolo 14 Calore ed energia interna	343	16.3 Conservazione della carica elettrica. Vari tipi di conduttori	400
14.1 Quantità di calore e unità di misura. Capacità termica di un corpo, calore specifico di una sostanza, principio zero della termodinamica	343	16.4 La carica elettrica come grandezza fisica. Campo elettrico e intensità del campo elettrico	401
14.2 Modalità di trasferimento del calore	345	16.5 Legge di Coulomb. Unità di misura delle cariche elettriche. Costante dielettrica	402

16.6	La costante dielettrica dell'acqua e il fenomeno della dissociazione elettrolitica	405
16.7	Le forze elettrostatiche come forze conservative. Energia potenziale e potenziale elettrico	406
16.8	Legge di Gauss	413
16.9	Dipolo elettrico. Molecole polari e apolari	420
16.10	Capacità elettrica. Condensatori. Polarizzazione dei dielettrici	422
16.11	Energia nel campo elettrico	430
DOMANDE DI VERIFICA		432
ESERCIZI		432

Capitolo 17	Corrente elettrica	435
17.1	Corrente elettrica e intensità di corrente	435
17.2	La corrente continua. Considerazioni energetiche sui circuiti elettrici	436
17.3	Le leggi di Ohm. Resistenza elettrica e resistività	438
17.4	Resistenze in serie e in parallelo	441
17.5	Effetto Joule. Potenza assorbita da un dispositivo	445
17.6	Elettrolisi ed elettroforesi	447
17.7	Potenziali di membrana	449
DOMANDE DI VERIFICA		452
ESERCIZI		452

Capitolo 18	Campo magnetico	455
18.1	Il campo magnetico	455
18.2	Il vettore induzione magnetica	456
18.3	Forza di deflessione su di una carica in moto	458
18.4	Forza di Lorentz	463
18.5	Azione di un campo magnetico statico su di un conduttore percorso da corrente	464
18.6	Momento magnetico di una spira percorsa da corrente	465
18.7	Proprietà magnetiche della materia	467
18.8	Generazione di campi magnetici: legge di Biot-Savart	468
18.9	Legge di Ampère	472
DOMANDE DI VERIFICA		478
ESERCIZI		478

Capitolo 19	Induzione elettromagnetica	481
19.1	Flusso del campo magnetico	481
19.2	Teorema di Gauss per il magnetismo	482
19.3	Flusso di induzione magnetica concatenato con un circuito	484
19.4	I fenomeni di induzione elettromagnetica	485
19.5	Legge di Faraday-Neumann	488
19.6	Mutua induzione	492
19.7	Fenomeni di autoinduzione. Energia nel campo magnetico	493
DOMANDE DI VERIFICA		495
ESERCIZI		496

Capitolo 20	Onde elettromagnetiche	497
20.1	Natura ondulatoria della luce. Ottica geometrica	497
20.2	Le leggi della riflessione e della rifrazione. Indice di rifrazione relativo ed assoluto	499
20.3	Alcune importanti proprietà degli indici di rifrazione	501
20.4	Rifrazione della luce attraverso un prisma. Fenomeno di dispersione	503
20.5	Riflessione totale	505
20.6	Fibre ottiche ed endoscopia	507
20.7	Diotro sferico	508
DOMANDE DI VERIFICA		512
ESERCIZI		512

Capitolo 21	Lenti e microscopio	515
21.1	Lenti sottili. Distanza focale e potere diottrico. Lenti convergenti e divergenti	515
21.2	Costruzione dell'immagine per le lenti sottili. Lente d'ingrandimento	519
21.3	Ingrandimento lineare e ingrandimento visuale	523
21.4	Microscopio composto. Potere risolutivo. Microscopio elettronico	525
21.5	L'occhio umano. Acuità visiva. Accomodazione. Difetti dell'occhio	531
DOMANDE DI VERIFICA		535
ESERCIZI		535

Capitolo 22	Fisica delle radiazioni	539	
22.1	Radiazioni elettromagnetiche e corpuscolari	539	
22.2	L'ipotesi quantistica	540	
22.3	Il nucleo	541	
22.4	I decadimenti nucleari	542	
22.5	La legge del decadimento radioattivo	542	
22.6	Energia di ionizzazione	544	
22.7	Radiazioni non ionizzanti	544	
22.8	Effetti biologici delle radiazioni non ionizzanti	546	
22.9	Grandezze usate per descrivere l'esposizione	548	
22.10	Applicazioni delle radiazioni non ionizzanti	548	
22.11	Radiazioni ionizzanti	549	
22.12	I danni biologici delle radiazioni ionizzanti	554	
22.13	Grandezze e unità di misura dosimetriche	554	
22.14	Applicazioni	556	
	DOMANDE DI VERIFICA	558	
	Appendici	559	
	APPENDICE A Tavole trigonometriche	561	
	APPENDICE B Richiami di matematica	562	
	APPENDICE C Richiami di geometria: aree e volumi	565	
	APPENDICE D Grandezze fisiche: unità di misura e fattori di conversione	566	
	APPENDICE E Soluzioni esplicite ragionate degli esercizi contrassegnati con un asterisco		
	Indice analitico	571	

10

Fenomeni di superficie nei liquidi



10.1 Le forze di coesione. Raggio d'azione molecolare e forze di richiamo

Qualche che sia lo stato di aggregazione di un corpo, fra le particelle che lo costituiscono si ha un'interazione di natura elettromagnetica. Le forze d'interazione fra le molecole di un liquido o di un gas prendono il nome di *forze di coesione* e sono essenzialmente attrattive. Ricordiamo che, mentre le particelle di una sostanza solida sono ordinate in una struttura regolare, le molecole di un liquido o di un gas possono muoversi in tutto il volume occupato dalla massa di sostanza e che i movimenti, disordinati e incessanti, sono tanto più vivaci quanto più elevata è la temperatura (agitazione termica).

L'intensità della forza d'interazione attrattiva fra due molecole di un liquido o di un gas, supposte a simmetria sferica, diminuisce piuttosto rapidamente al crescere della distanza r^* fra di esse e, al di là di un certo valore r^* della distanza, cui si dà il nome di *raggio d'azione molecolare*, l'intensità della forza d'interazione è così piccola da potersi ritenere trascurabile (fig. 10.1a,b).

Consideriamo, all'interno di una massa liquida, delimitata dalla superficie S , una molecola A a distanza r da S maggiore della distanza r^* corrispondente al raggio d'azione molecolare. Immaginiamo intorno ad A una sfera di raggio r^* (fig. 10.1c): per il significato attribuito a r^* , le molecole circostanti che si trovano nella sfera attraggono e sono attratte dalla molecola centrale, mentre risultano trascurabili le interazioni fra la mo-

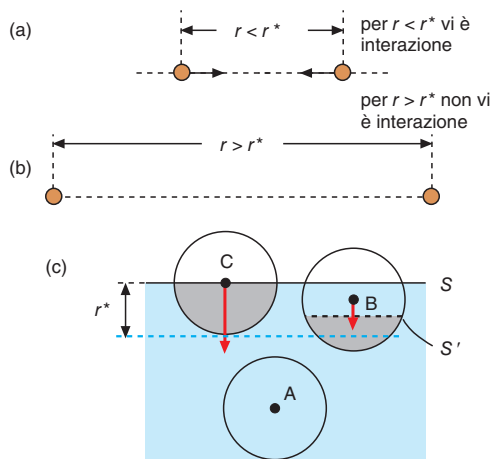


Figura 10.1 Rappresentazione dell'interazione fra due molecole di un liquido o di un gas, per distanze inferiori (a) o superiori (b) al raggio d'azione molecolare r^* . In (c), viene rappresentato in grigio l'insieme di molecole che contribuiscono a formare la forza di richiamo, che agisce su molecole in varie posizioni rispetto alla superficie limite.

lecola A e tutte le particelle esterne alla sfera. Poiché questa è immersa per intero nel liquido, la molecola A è attratta simmetricamente in tutte le direzioni dalle particelle circostanti che riempiono la sfera d'azione e che vi sono uniformemente distribuite. In media, le forze attrattive su A si fanno equilibrio e quindi hanno risultante nulla: la molecola A *si comporta come se le forze d'interazione mancassero del tutto*.

Consideriamo ora una molecola B a una distanza $r < r^*$ dalla superficie limite. Le azioni molecolari non sono più simmetriche; infatti, mentre le azioni esercitate su B dalle molecole contenute nella parte di sfera compresa fra S e la superficie ideale S' , simmetrica a S rispetto a B, si compensano per ragioni di simmetria, le forze attrattive su B derivanti dalle molecole contenute nella calotta sferica grigia non sono equilibrate dalle forze derivanti dalle particelle contenute nella calotta situata fuori del liquido, nello spazio occupato dall'aeriforme, ossia in una regione ove si ha mediamente un numero di molecole per unità di volume molto più piccolo. La particella B è quindi soggetta ad una forza risultante diretta verso l'interno del liquido e perpendicolare a S. Questa *forza di richiamo* (la cui intensità, evidentemente, è tanto maggiore quanto minore è la distanza della particella dalla superficie limite) si esercita su tutte le molecole che hanno la loro sfera d'azione solo in parte immersa nel liquido, cioè su tutte le particelle che si trovano sulla superficie limite o a una distanza da essa inferiore a r^* , all'interno e all'esterno del liquido.

In un liquido bisogna distinguere una parte interna, nella quale le molecole si muovono liberamente e si comportano come se le forze attrattive mancassero del tutto, ed una guaina esterna formata dalle molecole che risentono delle forze attrattive sotto forma di forze di richiamo. Una molecola che, nel suo moto di agitazione termica, si avvicini alla superficie limite del liquido risente dell'azione di una forza di richiamo che cresce al diminuire della distanza da S e raggiunge il suo valore massimo quando la particella viene a trovarsi nella posizione C, cioè sulla superficie limite (**fig. 10.1c**). A partire da questa posizione, se la molecola continua a spostarsi verso l'esterno, la forza di richiamo diminuisce, fino ad annullarsi quando la sfera d'azione è tutta al di là della superficie limite S. Durante tutto il percorso, viene compiuto, contro la forza di richiamo, un lavoro a spese dell'energia cinetica della particella, la quale riesce ad abbandonare il liquido solo se possedeva inizialmente un'energia cinetica maggiore del lavoro necessario a vincere la forza di richiamo.

Nell'evaporazione, sfuggono dal liquido solo le molecole che hanno i valori più alti dell'energia cinetica, mentre a quelle che restano competono energie che, mediamente, hanno un valore via via più basso. Per la relazione esistente fra temperatura ed energia cinetica molecolare media (paragrafo 13.4), *il liquido, nell'evaporare, si raffredda*, a meno che non gli venga restituita l'energia che esso va via via perdendo. L'energia fornita al liquido corrisponde al *calore latente di vaporizzazione* (paragrafo 14.9) e consente al sistema di compiere isotermicamente, cioè a temperatura costante, la transizione di fase.

10.2 Contrattilità delle superfici liquide. Tensione superficiale. Formazione di lamine sottili

Abbiamo visto che, per portare una molecola dall'interno di una massa liquida alla superficie libera, bisogna compiere un lavoro contro la forza

di richiamo. Questo fatto ci induce a pensare che *l'aumento della superficie libera di un liquido non può avvenire spontaneamente*, dal momento che esso implica un lavoro che è la somma dei lavori che devono essere spesi contro le forze di richiamo agenti su tutte le molecole che si devono portare dall'interno del liquido alla sua superficie per aumentarne l'estensione. Dobbiamo invece ritenere che spontaneo sia il processo opposto, cioè la diminuzione della superficie libera di un liquido, e che quindi questa tenda a contrarsi quanto più è possibile.

Questa deduzione è confermata dall'esperienza: *la superficie libera di un liquido manifesta una contrattilità caratteristica* che può essere provata in vari modi. Per esempio, una goccia di liquido tende ad assumere la forma di una sfera, cioè quella forma cui compete, a parità di volume, la superficie di area minima¹. Analogamente, la superficie di una lamina liquida (per esempio, una lamina di acqua saponata) ha l'area minima compatibile con la forma del contorno. Le gocce di liquido che possiamo normalmente osservare, come le gocce di rugiada su di una foglia o le gocce di acqua che rimangono aderenti alla parete interna di una bottiglia di vetro, non hanno la forma di una sfera, ma approssimativamente di una calotta sferica; infatti, la forma assunta in tali condizioni è una configurazione di equilibrio determinata non solo dalle forze legate alla contrattilità superficiale, ma anche dalle forze di gravità e dalle forze di adesione fra il liquido e la superficie con la quale esso è a contatto. Perché una goccia di liquido assuma effettivamente la forma di una sfera, bisogna che essa non sia soggetta ad altre forze oltre a quelle che determinano la contrattilità superficiale; queste condizioni possono ritenersi realizzate per una goccia sospesa in un liquido immiscibile e di uguale densità (per esempio, per una goccia di olio in una miscela di acqua ed alcool etilico di opportuna concentrazione): rimangono, in questo caso, attive le sole forze superficiali, essendo la forza di gravità equilibrata dalla spinta di Archimede (fig. 10.2).

Particolarmente istruttiva è l'esperienza illustrata in fig. 10.3. Il telaio rettangolare ABCD, il quale ha tre lati rigidi ed un lato mobile, può trattenere una lamina liquida di piccolissimo spessore una volta che esso sia stato immerso in acqua saponata. Se si dispone il telaio in un piano orizzontale, si osserva che il lato mobile CD tende a spostarsi verso il lato opposto AB. Questo significa che lungo il contorno della lamina agiscono delle forze, ad essa tangenti, che ne determinano la progressiva contrazione. Queste forze si esercitano anche lungo i tre lati rigidi ma, evidentemente, hanno effetto solo in corrispondenza del lato mobile.

Se indichiamo con τ la forza agente per unità di lunghezza del contorno, tangenzialmente alla superficie di ciascuna delle due facce contrattili della lamina, può dirsi che la forza risultante agente sul lato mobile, di lunghezza l , è

$$F = 2\tau l \quad (10.1)$$

Il fattore 2 nella (10.1) riflette il fatto che ci sono due superfici del liquido a contatto con l'aria, ciascuna delle quali esercita una forza τl .

Alla grandezza τ , il cui valore è legato a proprietà intrinseche del liquido, si dà il nome di *tensione superficiale* del liquido. Poiché è eguale al rapporto fra l'intensità di una forza e una lunghezza, essa va espressa in

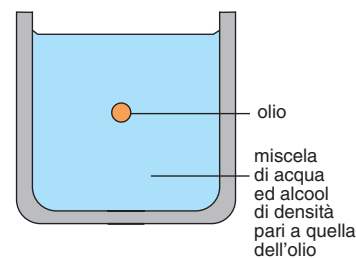


Figura 10.2 Una goccia sospesa in un liquido di uguale densità assume una forma sferica.

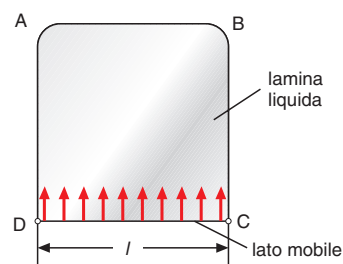


Figura 10.3 Telaio rettangolare ABCD, con il lato CD mobile, coperto da una sottile lamina liquida: il lato mobile CD tende a spostarsi verso il lato opposto AB a causa della tensione superficiale del liquido.

¹ Rispetto a una sfera di uguale volume, tutte le altre figure solide (cubo, parallelepipedo, cono, cilindro, ecc.) hanno una superficie esterna più estesa.

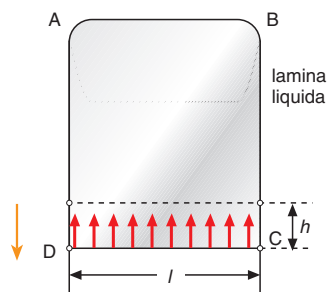


Figura 10.4 Rappresentazione della superficie ΔS di cui si vuole fare aumentare le due facce della lamina liquida nel telaietto ABCD. Si avvanza il lato mobile CD, nel senso della freccia a sinistra, di un tratto h .

N/m (newton su metro) nel SI e in dine/cm (dine su centimetro) nel sistema CGS.

Sappiamo ormai che, per aumentare la superficie libera di un liquido, bisogna compiere un lavoro. Si può dimostrare che il lavoro τ' necessario per incrementare di una quantità unitaria la superficie libera di un liquido si identifica con la tensione superficiale, cioè con la grandezza τ precedentemente definita. A tal fine, riprendiamo in considerazione la lamina di **fig. 10.3**. Se si vuole aumentare di ΔS la superficie di ciascuna delle due facce della lamina, bisogna far avanzare il lato mobile CD, nel senso della freccia a sinistra, di un tratto h tale che $\Delta S = lh$ (**fig. 10.4**). Il lavoro che occorre compiere per realizzare questa estensione della lamina è, per il significato attribuito a τ' ,

$$\mathcal{L} = 2\tau' \Delta S = 2\tau' lh \quad (10.2)$$

Questo lavoro, d'altra parte, è eguale a quello che bisogna compiere contro le forze tangenziali superficiali agenti sul lato CD e che, per la (10.1), ha modulo

$$\mathcal{L} = Fh = 2\tau lh \quad (10.3)$$

Il confronto tra la (10.2) e la (10.3) permette di concludere che $\tau = \tau'$.

Abbiamo già detto che la tensione superficiale dipende dalla natura del liquido. Aggiungiamo che, per uno stesso liquido, il valore di τ diminuisce al crescere della temperatura ed è influenzato notevolmente dalla natura del mezzo con cui il liquido è a contatto. I valori della tensione superficiale di liquidi diversi sono riportati nella **tab. 10.1**; come si vede, rispetto all'acqua e al mercurio, i liquidi organici (benzene, alcoli, etere etilico, ecc.) presentano valori molto più bassi.

TABELLA 10.1 Tensione superficiale di liquidi diversi a varie temperature

Liquido	Mezzo a contatto	Temperatura	Tensione superficiale in N/m
Acetone	Vapore	17 °C	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Acido formico	Vapore	17 °C	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Acqua	Aria	0 °C	$7,5 \cdot 10^{-2}$
Acqua	Aria	20 °C	$7,2 \cdot 10^{-2}$
Acqua	Aria	40 °C	$6,9 \cdot 10^{-2}$
Alcool etilico	Vapore	20 °C	$2,2 \cdot 10^{-2}$
Alcool etilico	Vapore	40 °C	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Alcool metilico	Vapore	20 °C	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Alcool propilico	Vapore	20 °C	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Benzene	Vapore	20 °C	$2,9 \cdot 10^{-2}$
Cloroformio	Aria	20 °C	$2,7 \cdot 10^{-2}$
Etere etilico	Vapore	0 °C	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Etere etilico	Vapore	20 °C	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Glicerina	Aria	17 °C	$6,5 \cdot 10^{-2}$
Mercurio	Vapore	20 °C	$43,5 \cdot 10^{-2}$
Nitrobenzene	Vapore	14 °C	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Olio d'oliva	Aria	20 °C	$3,2 \cdot 10^{-2}$
Tetracloruro di carbonio	Vapore	20 °C	$2,6 \cdot 10^{-2}$

La tensione superficiale dipende moltissimo dallo stato di purezza del liquido e, in particolare, della superficie. Vi sono sostanze, dette *tensioattive*, che hanno la proprietà di concentrarsi di preferenza nello strato superficiale e delle quali bastano piccolissime quantità per far diminuire di molto la tensione superficiale. Tipiche sostanze tensioattive sono il sapone e i comuni detersivi. Quanto è stato ora detto fa comprendere perché la determinazione della tensione superficiale di un liquido, in particolar modo dell'acqua, sia molto delicata e difficile. Una determinazione, perché dia un valore attendibile, richiede che il liquido da esaminare sia esente da qualsiasi contaminazione; richiede anche la massima pulizia dei recipienti destinati a contenere il liquido e degli oggetti che devono venire a contatto con esso.

Le nozioni sinora acquisite ci consentono di studiare il comportamento di una goccia di liquido sulla superficie di un altro liquido che sia con il primo immiscibile. Consideriamo, in particolare, una goccia di olio sulla superficie dell'acqua. In **fig. 10.5** è mostrata una sezione del sistema ottenuta mediante un piano verticale. Si hanno tre superfici di discontinuità: la superficie dell'acqua a contatto con l'aria, la superficie superiore della goccia, anch'essa a contatto con l'aria, e la superficie di separazione fra l'olio e l'acqua. Ciascuna di queste superfici è contrattile.

Vediamo quale condizione deve essere soddisfatta perché la goccia rimanga in equilibrio. A tal fine, consideriamo un tratto generico, di lunghezza Δl molto piccola, facente parte della linea circolare comune ai tre mezzi. A Δl sono applicate tre forze, legate alla contrattilità delle tre superfici di discontinuità. Se τ_1 è la tensione superficiale dell'acqua a contatto con l'aria, $\tau_1 \Delta l$ è il modulo della forza, tangente alla superficie libera dell'acqua, determinata dalla contrattilità di questa superficie; analogamente, se τ_2 e τ_3 sono, rispettivamente, la tensione superficiale dell'olio a contatto con l'aria e la tensione superficiale al limite acqua-olio, $\tau_2 \Delta l$ e $\tau_3 \Delta l$ sono i moduli delle forze determinate dalla contrattilità delle altre due superfici, la prima tangente alla superficie limite olio-aria, la seconda tangente alla superficie di contatto fra l'acqua e l'olio. Se la risultante delle tre forze fosse nulla, ciascun elemento Δl della linea circolare sarebbe in equilibrio e la configurazione della goccia non si modificherebbe. Perché questa condizione fosse soddisfatta, bisognerebbe che la forza di modulo $\tau_1 \Delta l$, dovuta alla contrattilità superficiale dell'acqua a contatto con l'aria, fosse equilibrata dalla risultante delle altre due. Però, se l'acqua è sufficientemente pura, questa condizione non è verificata, perché la tensione superficiale dell'acqua risulta molto più grande delle tensioni superficiali relative alle altre due superfici di discontinuità. Pertanto, l'equilibrio non può sussistere e la goccia di olio si espande sull'acqua *sino a formare su di essa una lamina molto sottile*. Lo stesso comportamento si riscontra, nei confronti dell'acqua, con gocce di altri liquidi con essa immiscibili.

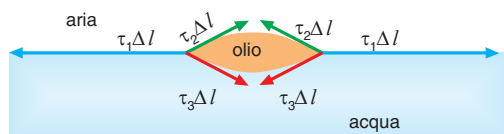


Figura 10.5 Sezione verticale del sistema rappresentato da una goccia di olio sulla superficie dell'acqua, con tre superfici di discontinuità: acqua-aria, olio-aria, olio-acqua.

10.3 Tensione delle superfici curve. Legge di Laplace

Consideriamo una lamina liquida sferica, riferendoci in particolare ad una bolla di acqua saponata. In ogni punto della lamina, tangenzialmente alla superficie, agiscono le forze della tensione superficiale, le quali tenderebbero a far diminuire la superficie della lamina. Poiché una diminuzione della superficie non può essere realizzata, se non con una diminuzione di volume della bolla, e la diminuzione di volume è necessariamente collegata con un aumento della pressione all'interno della lamina sferica, possiamo affermare che con la contrattilità della lamina è connessa una pressione, uniformemente distribuita sulla superficie, che tende a far diminuire il volume della bolla. Pertanto, la pressione p_i dell'aria all'interno della bolla è un po' più elevata della pressione esterna p_e in quanto somma della pressione p_e e della pressione p_c dovuta alla contrattilità superficiale. Che ciò sia vero è dimostrato dalla seguente semplice esperienza. Si soffi per un po' in una cannuccia che sia stata immersa nell'acqua saponata. Una volta che si è formata una piccola bolla all'estremità della cannuccia, si noterà che, se si smette di soffiare, la bolla tende a «rientrare» nella cannuccia: l'aria all'interno della bolla, essendo a una pressione superiore a quella dell'aria nella cannuccia, tende a trasferirsi in quest'ultima, determinando una progressiva contrazione di volume della bolla. L'effetto è più evidente con bolle di piccole dimensioni perché, come si vedrà fra breve, la pressione di contrattilità è tanto più elevata quanto più piccolo è il raggio della lamina sferica.

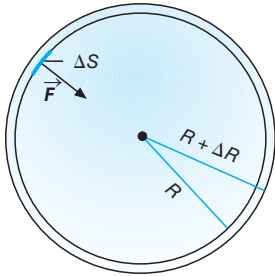


Figura 10.6 Rappresentazione di una bolla di raggio R gonfiata in modo che il suo raggio vari di ΔR .

Ci proponiamo ora di calcolare il valore della pressione di contrattilità p_c . A tal fine, supponiamo di gonfiare pochissimo la bolla, in modo che il suo raggio vari dal valore R al valore $R + \Delta R$, con ΔR quantità molto piccola rispetto a R (fig. 10.6). Poiché sulla superficie della lamina sferica è uniformemente distribuita la pressione p_c , sulla generica areola ΔS della bolla agisce una forza $\vec{F}$, di modulo $F = p_c \Delta S$, diretta verso il centro di curvatura. In conseguenza della variazione di volume, il punto di applicazione della forza si sposta di ΔR , nel verso opposto a quello di $\vec{F}$, e il corrispondente lavoro è, in valore assoluto,

$$\Delta \mathcal{Q} = F \Delta R = p_c \Delta R \Delta S \quad (10.4)$$

Facendo la somma di tutti i lavori corrispondenti alle areole $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_n$ in cui la superficie S della bolla può pensarsi suddivisa, si ottiene il lavoro $\mathcal{Q}$ che bisogna complessivamente compiere, contro le forze connesse con la contrattilità superficiale, per realizzare l'aumento di volume; dunque è

$$\begin{aligned} \mathcal{Q} &= p_c \Delta R \Delta S_1 + p_c \Delta R \Delta S_2 + \dots + p_c \Delta R \Delta S_n = \\ &= p_c \Delta R (\Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots + \Delta S_n) = p_c \Delta R S \end{aligned}$$

o, più esplicitamente,

$$\mathcal{Q} = 4\Delta R^2 p_c \Delta R \quad (10.5)$$

dal momento che è $S = 4\pi R^2$.

Il lavoro $\mathcal{Q}$ può essere valutato con un altro criterio, facendo riferimento al secondo significato che abbiamo attribuito alla tensione superficiale τ . Poiché questa esprime anche il lavoro da compiere per aumentare di una unità la superficie di ciascuna delle due facce della bolla (quella

interna e quella esterna) e la variazione della superficie di ciascuna delle due facce è $[4\pi(R + \Delta R)^2 - 4\pi R^2]$, si ha

$$\mathcal{Q} = 2\tau[4\pi(R + \Delta R)^2 - 4\pi R^2] = 2\tau[4\pi R^2 + 4\pi(\Delta R)^2 + 8\pi R\Delta R - 4\pi R^2] = 2\tau[8\pi R\Delta R + 4\pi(\Delta R)^2]$$

Dal momento che è $\Delta R \ll R$, è anche $(\Delta R)^2 \ll R\Delta R$, cosicché possiamo trascurare il secondo termine nella parentesi quadra rispetto al primo termine e ritenere²

$$\mathcal{Q} = 16\pi\tau R\Delta R \quad (10.6)$$

Il lavoro necessario per realizzare l'aumento di volume è dunque esprimibile mediante la (10.5) e la (10.6). Eguagliando i secondi membri delle due relazioni, si ha

$$4\pi R^2 p_c \Delta R = 16\pi\tau R\Delta R$$

da cui, semplificando e risolvendo rispetto a p_c , si ottiene il valore della pressione dovuta alla contrattilità superficiale di una lamina sferica:

$$p_c = \frac{4\tau}{R} \quad (10.7)$$

La pressione p_c risulta inversamente proporzionale al raggio e questo risultato è confermato dall'esperienza illustrata in **fig. 10.7**. Due bolle di raggio diverso, comunicanti attraverso un tubo, non sono in equilibrio, poiché l'aria nella bolla di raggio minore risente di una pressione di contrattilità maggiore; di conseguenza, l'aria si riversa dalla bolla più piccola in quella più grande, cosicché questa si gonfia e l'altra si contrae.

Gli alveoli polmonari, ricoperti di un sottile strato di liquido, possono essere assimilati a piccole cavità sferiche contrattili fra loro comunicanti. Se nella respirazione avvenisse ciò che si verifica con le bolle dell'esempio precedente, i polmoni costituirebbero un sistema instabile, giacché rimarrebbero aperti solo gli alveoli più grandi; anzi, nella inspirazione, il volume degli alveoli di dimensioni maggiori potrebbe diventare così grande da determinarne la rottura. A far sì che, nelle fasi di inspirazione e di espirazione, l'insieme degli alveoli si comporti sempre come un sistema stabile, intervengono l'elasticità del tessuto costituente le pareti degli alveoli e una continua modifica della tensione superficiale del liquido che li bagna.

Per una superficie sferica, convessa o concava, delimitante una massa liquida (per esempio, per la superficie di una goccia sferica o per la superficie che delimita una bolla gassosa in un liquido), il calcolo porta al risultato che la pressione connessa con la contrattilità superficiale è

$$p_c = \frac{2\tau}{R} \quad (10.8)$$

La (10.8) differisce dalla (10.7) per il fatto che in essa compare il coefficiente 2 invece del coefficiente 4; infatti, ora vi è una sola superficie libera.

Poiché i valori delle pressioni date dalle (10.7) e (10.8) sono tanto più piccoli, a parità di tensione superficiale, quanto maggiore è il raggio della superficie sferica, si ottiene al limite $p_c = 0$ per $R = \infty$: la pressione di contrattilità è dunque caratteristica della *curvatura* della superficie libera, an-

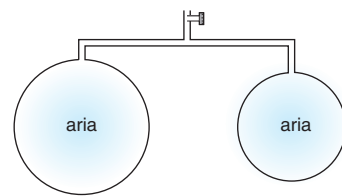


Figura 10.7 Bolle di raggio diverso comunicanti attraverso un tubo. L'aria si riversa dalla bolla più piccola in quella più grande, a causa della diversa pressione di contrattilità.

² Se, per esempio, è $R = 10$ cm e $\Delta R = 10^{-1}$ mm = 10^{-2} cm, si ha $(\Delta R)^2 = 10^{-4}$ cm² e $R\Delta R = 10 \cdot 10^{-2}$ cm² = 10^{-1} cm²: la quantità $(\Delta R)^2$ è 1000 volte più piccola della quantità $R\Delta R$.

nullandosi lì dove la curvatura è nulla $[(1/R) = 0]$, cioè lì dove la superficie è piana. Per tale ragione, essa si chiama *tensione della superficie curva*.

Il problema di cui ci siamo occupati è stato generalizzato da Laplace per qualsiasi superficie delimitante una massa liquida: la *legge di Laplace* stabilisce che, in un punto di una superficie limite qualsiasi, in equilibrio, la pressione connessa con la contrattilità superficiale, cioè con l'esistenza di forze tangenziali superficiali, è

$$p_c = \tau \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (10.9)$$

essendo R_1 e R_2 i raggi di curvatura in quel punto di due sezioni della superficie ottenute mediante due piani, fra loro ortogonali, passanti per la normale alla superficie nel punto considerato³. La (10.9) contiene, come caso particolare, la (10.8); infatti, se la superficie è sferica, con raggio R , si ha $R_1 = R_2 = R$ e quindi $(1/R_1) + (1/R_2) = 2/R$. In accordo con le considerazioni precedentemente svolte, la pressione di contrattilità, qualunque sia la superficie, è sempre volta dalla parte della concavità.

L'espressione (10.7) della tensione della superficie curva fa comprendere perché l'acqua saponata fa schiuma molto più facilmente dell'acqua pura. Infatti, la stabilità delle bolle formanti la schiuma è essenzialmente determinata dal valore della pressione p_c che tende a romperle. Poiché le sostanze tensioattive, come il sapone e i detersivi, abbassano di molto il valore di τ , e quindi di p_c , le bolle formate da acqua in cui siano presenti piccole quantità di queste sostanze, hanno, rispetto alle bolle formate da acqua pura, una stabilità, e quindi una persistenza, molto maggiore. Schiume persistenti alla superficie del mare o di un lago sono indice della presenza di sostanze inquinanti.

Grazie alla tensione delle superfici curve, si riesce, operando opportunamente, a fare in modo che una monetina di alluminio, oppure uno spillo o un ago, si mantenga sulla superficie dell'acqua senza affondare. L'ago, lo spillo e la moneta sono, infatti, sostenuti dalla pressione p_c volta verso l'alto, connessa con la superficie curva esistente al di sotto del corpo poggiato. Insetti come l'idrometra vivono sulla superficie di acque pulite e tranquille, scivolando su di essa con le loro zampe sottili, sostenuti dalla tensione della superficie curva.

10.4 Fenomeni capillari. Legge di Jurin

Consideriamo una piccola massa di liquido appartenente allo strato superficiale e situata nelle immediate vicinanze di una parete verticale (fig. 10.8). Questa massa può ritenersi soggetta a due forze $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, dirette come in figura, che individuano, rispettivamente, la risultante delle forze di coesione, cioè delle forze attrattive esercitate sulla porzione di liquido considerata dalle molecole dello stesso liquido ad essa più vicine, e la risultante delle forze di adesione, ossia delle forze esercitate dalle molecole del materiale costituente la parete.

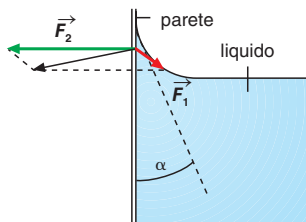


Figura 10.8 Rappresentazione della risultante delle forze di coesione, $\vec{F}_1$, e della risultante delle forze di adesione, $\vec{F}_2$, che agiscono su una piccola massa di liquido appartenente allo strato superficiale e posta vicino ad una parete verticale.

³ Dalla geometria è noto che, in un punto di una superficie qualsiasi, la somma delle curvature di due sezioni ortogonali è costante, qualunque sia la coppia di sezioni considerate. Alla quantità $c = (1/R_1) + (1/R_2)$, essendo R_1 e R_2 i raggi di curvatura delle due sezioni nel punto considerato, si dà il nome di *curvatura della superficie in quel punto*.

Se, come è mostrato in figura, la forza $\vec{F}_2$ ha intensità notevolmente maggiore della forza $\vec{F}_1$, la risultante delle due forze è nettamente diretta verso l'esterno della parete e, per l'equilibrio, la superficie libera deve, in vicinanza della parete stessa, assumere una configurazione tale che si abbia una *concavità* rivolta verso l'alto; al contrario, se è $\vec{F}_1$ a prevalere su $\vec{F}_2$, in prossimità della parete, la superficie libera del liquido presenta una *convessità* rivolta verso l'alto. Nel primo caso si dice che il liquido *bagna la parete* (esempio: coppia acqua-vetro), nel secondo caso si dice che il liquido *non bagna* (esempio: mercurio-vetro). L'angolo α , che il piano tangente alla superficie libera del liquido, in uno dei punti di contatto, forma con la parete si chiama *angolo di raccordo* o *di contatto*. Evidentemente è $\alpha < 90^\circ$ o $\alpha > 90^\circ$, a seconda che il liquido bagni o non bagni. Quanto più accentuata è la concavità, tanto più piccolo è l'angolo di raccordo.

Si immerga in un liquido parte di un *tubicino capillare* (cioè di un tubicino di sezione interna molto piccola) aperto agli estremi; se il liquido bagna le pareti del capillare, si noterà che il livello del menisco del liquido all'interno del tubicino è superiore al livello del liquido all'esterno (*fenomeno dell'innalzamento capillare*, [fig. 10.9](#))⁴. Il fenomeno si spiega facilmente se si tiene presente che la superficie libera del liquido nel capillare è, per quel che si è detto, concava (anzi, se il tubicino ha un diametro sufficientemente piccolo, la configurazione del menisco è quella di una calotta sferica) e che sulla superficie libera incurvata di un liquido agisce una pressione volta sempre dalla parte della concavità (tensione della superficie curva).

Se il tubicino è sufficientemente sottile, la superficie libera del liquido nel capillare è una calotta sferica di raggio R e la tensione della superficie curva con essa collegata è, per la (10.8),

$$p_c = \frac{2\tau}{R}$$

essendo τ la tensione superficiale del liquido. Nell'espressione della pressione di contrattilità p_c , possiamo far figurare il raggio interno R' del tubicino in luogo del raggio R di curvatura della superficie concava. La [fig. 10.9](#) mostra, infatti, che è $R' = R \cos \alpha$, ove α è l'angolo di raccordo. Dunque è anche

$$p_c = \frac{4\tau}{R'} \cos \alpha$$

L'altezza h della quale il liquido, di densità ρ , si innalza nel tubicino è quella per cui la corrispondente pressione idrostatica $h\rho g$, che tenderebbe a far ricadere il liquido, è in grado di equilibrare la tensione della superficie curva, p_c , responsabile dell'innalzamento:

$$\frac{2\tau}{R'} \cos \alpha = h\rho g \quad (10.10)$$

In particolari situazioni, l'angolo di raccordo può essere uguale a 0° ($\cos \alpha = 1$). Ciò accade, per esempio, con acqua pura a contatto con vetro molto pulito in tubicini sufficientemente sottili. In tali condizioni, è $R = R'$;

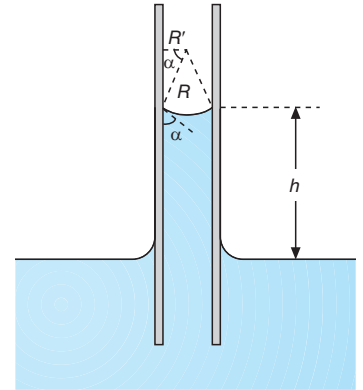


Figura 10.9 Fenomeno dell'innalzamento capillare all'interno di un tubicino capillare immerso in un liquido: se il liquido "bagna le pareti", il livello del menisco del liquido è superiore al livello del liquido all'esterno.

⁴ Naturalmente, perché il fenomeno sia effettivamente osservabile, bisogna che il tubicino sia di materiale trasparente, per esempio di vetro.

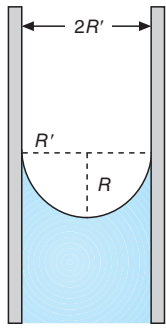


Figura 10.10 Fenomeno dell'innalzamento capillare: in alcune situazioni, il menisco assume la configurazione di una calotta semisferica, con angolo di raccordo uguale a 0° .

il menisco assume la configurazione di una calotta semisferica (fig. 10.10) e la (10.10) assume la forma particolare

$$\frac{2\tau}{R'} = h\rho g \quad (10.11)$$

Questa relazione esprime la *legge di Jurin*, secondo cui, in assenza di contaminazioni e in tubicini sufficientemente sottili, l'innalzamento capillare di un liquido, di densità ρ e tensione superficiale τ , è inversamente proporzionale al raggio interno del tubicino (fig. 10.11).

Fenomeni di *abbassamento capillare* si riscontrano con i liquidi che non bagnano le pareti. In un tubicino capillare, il menisco di un liquido che non bagna presenta una convessità rivolta verso l'alto, cosicché la tensione della superficie curva è volta verso il basso. L'abbassamento del menisco, rispetto al livello esterno, è ancora regolato dalla (10.10).

L'azione assorbente dei lucignoli, della carta porosa e delle spugne è dovuta a fenomeni di capillarità tra le fibre. L'innalzamento capillare può dar ragione della salita della linfa nei vasi sottili di una pianta solo quando questa sia di piccole dimensioni. Per gli alberi e le piante d'alto fusto, si ritiene che altri meccanismi, peraltro non del tutto chiariti, siano responsabili del fenomeno.

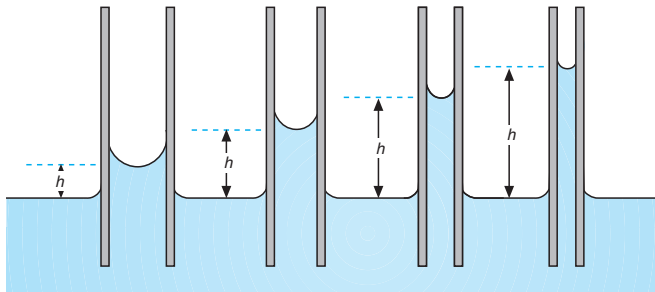


Figura 10.11 In assenza di contaminazioni e in tubicini sufficientemente sottili, l'innalzamento capillare h di un liquido è inversamente proporzionale al raggio interno del tubicino.

10.5 Contagocce

Consideriamo la sezione terminale di un tubo capillare, a pareti spesse, tenuto verticalmente e riempito con un liquido che ne bagna le pareti interne. Per gravità, il liquido fluisce lentamente dalla sezione e la sua superficie limite inferiore, che è contrattile, assume la forma di una calotta sferica, con la convessità rivolta verso il basso (fig. 10.12a). Connessa con la calotta vi è una pressione, cui corrisponde una forza volta verso l'alto (tensione della superficie curva) il cui valore è dato dalla (10.8). A mano a mano che giunge nuovo liquido, il raggio R della calotta va via via diminuendo e l'aumento graduale della pressione p_c che ne consegue è in grado di equilibrare il progressivo aumento del peso del liquido fuoriuscito dal cannello (fig. 10.12a,b). L'arrivo di altro liquido, con il corrispondente aumento del peso del liquido fuoriuscito, fa sì che la configurazione della superficie limite cessi di essere quella di una semplice calotta sferica e divenga quella mostrata in fig. 10.12c,d; il fatto saliente è la comparsa di una strozzatura, il cui raggio va poi progressivamente diminuendo. In tali condizioni, a contrastare il progressivo aumento del peso del liquido al di sotto della strozzatura non saranno tanto le forze legate alla tensione della superficie curva, quanto le forze, legate alla ten-

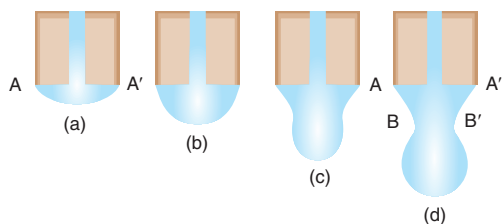


Figura 10.12 Fasi di formazione di una goccia in uscita da un tubo capillare posto verticalmente. Per gravità, il liquido fluisce lentamente dalla sezione e la sua superficie limite inferiore assume la forma di una calotta sferica (a). Il progressivo aumento del peso del liquido fa diminuire il raggio di curvatura, con l'aumento graduale della pressione p_c (b). Con l'arrivo di altro liquido, la configurazione di equilibrio della superficie limite diventa quella mostrata in (c) e (d).

sione superficiale, che agiscono lungo il perimetro circolare della strozzatura. Con il distacco della goccia, si ha il ritorno alla configurazione (a).

Un istante prima del distacco, le forze associate alla pressione di contrattilità lungo la superficie sferica hanno una risultante praticamente nulla⁵, cosicché a equilibrare il peso del liquido al di sotto della sezione BB' sono solo le forze, dirette verso l'alto, che agiscono lungo il contorno della strozzatura (fig. 10.13). Possiamo dunque dire che, un istante prima del distacco, il peso $m\vec{g}$ della massa m al di sotto della sezione BB' , di raggio r_0 , è equilibrato dalla risultante delle forze legate alla tensione superficiale ed attive lungo il perimetro circolare, di lunghezza $2\pi r_0$, della sezione. Per il primo significato attribuito alla grandezza τ (paragrafo 10.2), la risultante ha intensità $2\pi r_0 \tau$; un istante prima del distacco, è pertanto

$$mg = 2\pi r_0 \tau \quad (10.12)$$

Il valore di r_0 dipende dall'area della sezione terminale AA' del tubicino ed è indipendente dalla natura del liquido che gocciola. Ne consegue, per la (10.12), che *il peso mg di ciascuna goccia dipende soltanto dalla tensione superficiale del liquido* ed è tanto più grande quanto più elevata è τ . Il dispositivo, che prende il nome di *contagocce*, consente dunque di ottenere, con uno stesso liquido, goccioline di uguali dimensioni e, quindi, di dosare prodotti medicinali liquidi.

10.6 Embolia gassosa

La tensione delle superfici curve è in grado di spiegare altri fenomeni. È ben noto che, in seguito ad una rapida decompressione, che si determina quando un palombaro o un sommozzatore risale troppo rapidamente in superficie, si manifesta la presenza di bolle di gas, essenzialmente di azoto, nella corrente sanguigna (*embolia gassosa*). Sotto la spinta del sangue, i menischi di una bolla in un piccolo vaso sanguigno possono deformarsi, così come è mostrato in fig. 10.14, cosicché il menisco 1, situato più a valle, viene ad assumere un raggio di curvatura medio più piccolo di quello corrispondente al menisco 2. Pertanto, la tensione della superficie curva $p_{c,1}$, connessa con il primo menisco, è, in conformità con la legge di Laplace, più grande di quella, $p_{c,2}$, collegata all'altra superficie. Poiché le due tensioni sono volte dalla parte delle rispettive concavità, la pressione risultante ($p_{c,1} - p_{c,2}$) è volta in senso opposto a quello del flusso sangui-

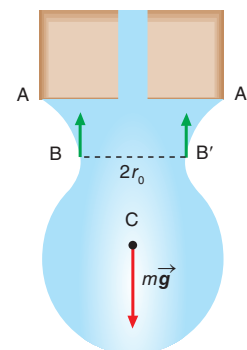


Figura 10.13 Formazione di una goccia: un istante prima del distacco, il peso del liquido al di sotto della sezione BB' è equilibrato dalle sole forze che agiscono lungo il contorno della strozzatura.

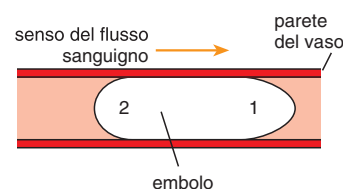


Figura 10.14 Bolla in un piccolo vaso sanguigno: il menisco 1, situato più a valle, assume un raggio di curvatura medio più piccolo di quello del menisco 2.

⁵ Alla pressione di contrattilità sono associate forze uniformemente distribuite sulla superficie sferica e dirette verso il centro di curvatura (paragrafo 10.3). Finché il liquido fuoriuscito ha la configurazione di una calotta sferica (fig. 10.12a,b), le forze hanno una risultante volta verso l'alto e sono perciò in grado di equilibrare il peso del liquido; quando si giunge alla configurazione mostrata in fig. 10.13, le forze distribuite lungo la superficie sferica, dirette verso il centro di curvatura, sono volte in parte verso l'alto e in parte verso il basso, con la conseguenza di avere una risultante praticamente nulla.

gno e può assumere un valore tanto elevato da equilibrare la pressione del sangue, con conseguente arresto della circolazione in quel vaso. La gravità del danno arrecato è in rapporto alla sede colpita (cervello, cuore, polmoni, ecc.) e al numero di vasi interessati.

Quanto è stato detto fa comprendere perché si debba, prima di iniettare un liquido in un vaso sanguigno o in un tessuto, eliminare accuratamente l'aria eventualmente presente nella siringa.



Domande di verifica

- 1 Cosa si intende per tensione superficiale e qual è la sua origine molecolare?
- 2 Descrivere il concetto di angolo di contatto e spiegare come influisce sulla bagnabilità di una superficie da parte di un liquido.
- 3 Qual è la differenza tra un fenomeno di capillarità ascendente e uno di capillarità discendente? Fornire esempi di entrambi i casi.
- 4 Spiegare il fenomeno dell'adesione e della coesione nei fluidi. Fornire esempi di ciascuno di questi fenomeni.
- 5 Descrivere il processo di evaporazione e la sua influenza sulla temperatura e sull'umidità dell'ambiente circostante.
- 6 Cosa si intende per tensione di vapore e come è correlata alla temperatura di un liquido?
- 7 Perché le gocce d'acqua sono approssimativamente sferiche?
- 8 Perché è molto più facile creare delle bolle con acqua saponata che con acqua pura?

ESERCIZI

(In appendice è riportata la soluzione esplicita degli esercizi contrassegnati con un asterisco).

- *10.1** Un insetto è poggiato sulla superficie dell'acqua di uno stagno, producendovi, con ciascuna delle sue sei zampe, un menisco concavo di raggio $R = 1,0$ mm. Assumendo che, per ciascuna zampa, la forza sostentatrice verticale sia applicata su di una superficie orizzontale di area πR^2 , determinare la massa dell'insetto. Si assegni all'acqua la tensione superficiale di $0,070$ N/m. (R.: $0,27$ g).
- 10.2** Assegnando alla tensione superficiale dell'acqua saponata il valore di $0,040$ N/m, calcolare la sovrappressione di contrattilità all'interno di una bolla di sapone di raggio $5,0$ cm. (R.: $3,2$ Pa).
- 10.3** Un tubicino di vetro, il cui diametro interno è di $0,50$ mm, è aperto ad entrambe le estremità ed immerso verticalmente in acqua. (a) Assumendo

che l'angolo di contatto sia uguale a zero ed assegnando all'acqua la tensione superficiale di 72 dine/cm, calcolare l'innalzamento dell'acqua nel tubicino. (b) Se il tubicino viene abbassato in modo che esso sporga dall'acqua solo per 3 cm, che cosa accade? [R.: (a) $5,9$ cm; (b) l'acqua raggiunge la parte superiore del tubicino e inizia a traboccare].

- *10.4** A 20°C , un tubicino di vetro molto sottile, aperto agli estremi e ben pulito, viene dapprima immerso nell'acqua (tensione superficiale di 72 dine/cm) e poi nell'alcool etilico (densità assoluta di $0,79$ g/cm³); gli innalzamenti capillari osservati sono, rispettivamente, di 46 mm e di 18 mm. Assumendo che per entrambi i liquidi l'angolo di contatto sia di 0° , determinare la tensione superficiale dell'alcool alla temperatura di esperienza. (R.: 22 dine/cm).

- 10.5** Una pianta acquatica si innalza di 30 cm sulla superficie dell'acqua. Qual è il raggio massimo che i vasi capillari della pianta devono avere perché possa ritenersi che essa sia alimentata per sola capillarità? Si assuma che l'angolo di contatto sia eguale a zero e si assegni alla linfa la stessa densità e la stessa tensione superficiale ($0,070 \text{ N/m}$) dell'acqua. (R.: $48 \text{ }\mu\text{m}$).
- *10.6** Una bollicina d'aria del diametro di 1 mm aderisce ad una pianta acquatica di uno stagno, alla profondità di 12 cm. Se la pressione esterna, cioè la pressione in corrispondenza della superficie libera dell'acqua, ha il valore di $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (pressione normale), qual è la pressione effettiva dell'aria nella bollicina? Si assuma per la tensione superficiale dell'acqua il valore di $0,070 \text{ N/m}$. (R.: $1,028 \cdot 10^5 \text{ Pa}$).



Semestre Filtro 2026-2027

Fisica Generale

basato sull'opera di E. Ragozzino

Manuale conforme al **Syllabus**
per il **semestre filtro 2026-2027**

Nel volume trovi strumenti utili per studiare meglio

Accedi ai **contenuti digitali** e alle risorse pensate per supportarti
nella preparazione al **semestre filtro**.



Eddie,
l'assistente virtuale
per sintesi e quiz



APP EXAM MANAGER
con migliaia
di quiz di Fisica



Versione
Ebook

Le risorse digitali sono accessibili tramite il **codice personale** presente nel volume.
Attivazione online. Servizio gratuito con validità di **18 mesi**.


EdiSES
EDIZIONI





Semestre Filtro 2026-2027

Fisica Generale

basato sull'opera di E. Ragozzino

Manuale conforme al **Syllabus**
per il **semestre filtro 2026-2027**

Nel volume trovi strumenti utili per studiare meglio

Accedi ai **contenuti digitali** e alle risorse pensate per supportarti
nella preparazione al **semestre filtro**.



Eddie,
l'assistente virtuale
per sintesi e quiz



APP EXAM MANAGER
con migliaia
di quiz di Fisica



Versione
Ebook

Le risorse digitali sono accessibili tramite il **codice personale** presente nel volume.
Attivazione online. Servizio gratuito con validità di **18 mesi**.


EdiSES
EDIZIONI

