

Comprende



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

A. Lascialfari • F. Borsa • A. Gueli

Principi di **Fisica**

per indirizzo biomedico e farmaceutico

III edizione



Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse

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



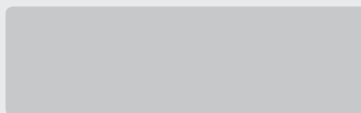
COLLEGATI AL SITO
EDISESUNIVERSITA.IT

ACCEDI AL
MATERIALE DIDATTICO

SEGUI LE
ISTRUZIONI

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**.

Principi di Fisica

PER INDIRIZZO BIOMEDICO E FARMACEUTICO

III EDIZIONE

Alessandro Lascialfari

Università degli Studi di Pavia

Ferdinando Borsa

Università degli Studi di Pavia

Anna Maria Gueli

Università degli Studi di Catania



Alessandro Lascialfari, Ferdinando Borsa, Anna Maria Gueli

PRINCIPI DI FISICA

per indirizzo biomedico e farmaceutico

III edizione

Copyright © 2020, Edises Università s.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

2024 2023 2022 2021 2020

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 Università S.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli

www.edisesuniversita.com
info@edisesuniversita.it

ISBN 978 88 3623 020 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 su *assistenza.edises.it*

Prefazione alla nuova edizione

Questa nuova edizione del libro di testo di Fisica per indirizzi biomedici e farmaceutici risponde a due esigenze che si sono riscontrate nell'utilizzo della precedente edizione. In primis, abbiamo sentito la necessità di apportare numerose correzioni, soprattutto per errori di stampa, correzioni che in parte ci sono state segnalate da colleghi, in particolare dal Prof. Luigi Rigon, che vogliamo qui ringraziare. La seconda esigenza è stata quella di aggiungere numerosi esempi interamente svolti nel testo ed esercizi alla fine di ogni capitolo, alcuni dei quali con relativo risultato in appendice. La Fisica è infatti una scienza sperimentale ed operativa, e si deve quindi mettere lo studente nella condizione di riuscire ad applicare le leggi e i concetti fondamentali eseguendo semplici operazioni per arrivare a risposte numeriche che possano essere utilizzate in pratica. Del resto questa impostazione operativa risponde al criterio, dichiarato nella prefazione alla prima edizione, di voler offrire un corso di carattere formativo e metodologico anziché puramente nozionistico. Ad eccezione di qualche elemento nuovo di radiologia, abbiamo resistito alla tentazione di aggiungere altro materiale per mantenere il testo agile e di facile apprendimento.

Prefazione alla precedente edizione

Il presente testo è il risultato di una lunga esperienza di insegnamento della Fisica, risalente al 1970, che si è estesa in sequenza ai corsi di Laurea di Medicina, Biologia, Biotecnologia, Chimica e Tecnologie Farmaceutiche e Farmacia delle Università di Pavia e di Milano, e che ha attraversato le numerose riforme dei corsi di studio presso i diversi corsi di Laurea.

Il principio ispiratore del nostro insegnamento è stato fin dall'inizio la convinzione che la funzione della Fisica negli studi biomedici e farmaceutici debba essere soprattutto di carattere formativo e metodologico. Per realizzare questo abbiamo ritenuto utile operare una certa integrazione e armonizzazione degli argomenti di Fisica con altri argomenti facenti parte più specificatamente dei curricula degli studi biomedici e farmaceutici. Si è così scelto di inserire nei capitoli in cui vengono presentati i concetti fondamentali della Fisica anche alcune semplici e schematiche applicazioni di questi concetti e leggi fisiche ad argomenti di interesse biomedico. Sono stati anche inseriti tre capitoli interamente dedicati a queste applicazioni: Termodinamica nei sistemi biologici, Strumenti ottici e I potenziali bioelettrici. Queste applicazioni non sono svolte con la pretesa di essere complete ed esaurienti, ma piuttosto con l'intento di fornire esempi di una trattazione scientificamente rigorosa, anche se necessariamente ridotta a una forma schematica ed essenziale, di alcuni affascinanti problemi che si incontrano in biomedicina e farmacia.

Il secondo principio ispiratore è stato quello di cercare di trattare gli argomenti nel modo più semplice e agile possibile, anche a costo di omettere temi importanti in Fisica ma da noi ritenuti non essenziali in un corso propedeutico per studenti di discipline biomediche e farmaceutiche. Tuttavia, per mantenere un minimo di rigore nella trattazione, si è fatto uso delle nozioni di Analisi matematica compreso il calcolo differenziale e integrale, illustrando comunque alcune delle derivazioni delle espressioni matematiche, per renderle più comprensibili da un punto di vista fisico.

Per finire desideriamo ringraziare colleghi e amici che in tutti questi anni di collaborazione scientifica e didattica hanno contribuito con discussioni, consigli e suggerimenti alla realizzazione di questo testo.

Pavia, Marzo 2014

FERDINANDO BORSA
ALESSANDRO LASCIALFARI

Indice generale

1 Le grandezze fisiche e la loro misura

1.1	Le grandezze fisiche	1
1.2	Dimensioni di una grandezza	3
1.3	Valori approssimati di lunghezza, massa, tempo. Sistemi di unità di misura e conversioni	5
1.4	Quantità scalari e quantità vettoriali	8
1.5	Operazioni sulle quantità vettoriali	11
1.6	Calcoli e cifre significative	15
	► <i>Esercizi e problemi</i>	16

2 Cinematica

2.1	Introduzione alla meccanica	19
2.2	Posizione, velocità e accelerazione	19
2.3	Moto rettilineo uniforme e uniformemente accelerato	23
2.4	Moto circolare uniforme e non uniforme	30
2.5	Moto armonico	33
	► <i>Esercizi e problemi</i>	35

3 Dinamica

3.1	Le forze	37
3.2	Le leggi della dinamica	38
3.3	La forza di gravità	43
3.4	La forza di attrito	44
3.5	Massa, peso e densità	48
3.6	La forza di attrito viscoso e la sedimentazione	49
3.7	La forza centrifuga e la centrifugazione	50
3.8	Esempi di moto armonico	52
3.9	Cenni di dinamica del corpo rigido	56
	► <i>Esercizi e problemi</i>	59

4 Statica

4.1	Le forze	63
4.2	Il momento di una forza	63
4.3	Condizioni di equilibrio traslazionale e rotazionale	64
4.4	Composizione di forze parallele: il baricentro	67
4.5	Alcuni esempi di statica del corpo umano	69
	► <i>Esercizi e problemi</i>	74

5 Lavoro, energia e potenza

5.1	Forze e campi di forze	79
5.2	Lavoro ed energia	81
5.3	Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica	86
5.4	Energia potenziale e forze conservative	87
5.5	Conservazione dell'energia meccanica	89
5.6	Energia potenziale e forze: condizioni di equilibrio di un sistema meccanico	94
5.7	Potenza e rendimento	97
5.8	Lavoro e potenza muscolare	97
	► <i>Esercizi e problemi</i>	103

6 Statica e dinamica dei fluidi

6.1	Equilibrio di un fluido	105
6.2	Misura della pressione	110
6.3	Tensione superficiale	111
6.4	Fenomeni di capillarità	112
6.5	Dinamica dei fluidi perfetti	114
6.6	Regime laminare e regime turbolento	119
6.7	Idrodinamica della circolazione del sangue	122

6.8	Lavoro e potenza cardiaca	126
6.9	Viscosità del sangue	128
6.10	Formula di Laplace ed equilibrio dei vasi sanguigni	131
	► <i>Esercizi e problemi</i>	134

7 I gas e le soluzioni

7.1	Introduzione	137
7.2	Leggi dei gas perfetti	138
7.3	Leggi dei gas reali	140
7.4	Pressione parziale	144
7.5	Le soluzioni	145
7.6	Diffusione	147
7.7	Osmosi e pressione osmotica	149
7.8	Lavoro osmotico e potenziale chimico in soluzioni diluite	153
7.9	Potenziale elettrochimico ed equilibrio di Donnan-Gibbs	155
7.10	Fenomeni osmotici e diffusione di gas nell'organismo umano	156
7.11	Meccanica della respirazione	160
7.12	Equilibrio meccanico degli alveoli	163
	► <i>Esercizi e problemi</i>	165

8 Termologia e termodinamica

8.1	Sistema e stato termodinamico	169
8.2	Trasformazioni termodinamiche	170
8.3	Il lavoro in termodinamica	172
8.4	Calore e temperatura. Principio zero	173
8.5	Energia interna e primo principio della termodinamica	175
8.6	Misura della temperatura	178
8.7	Capacità termica e calori specifici	180
8.8	Trasformazioni di stato e calori latenti	182
8.9	Secondo principio della termodinamica	185
8.10	Cenni sull'entalpia, sull'entropia e sull'energia libera	190
	► <i>Esercizi e problemi</i>	195

9 Termodinamica nei sistemi biologici

9.1	Introduzione	197
9.2	Meccanismi di trasmissione del calore	197
9.3	Principi della termodinamica e fisiologia	202
9.4	Metabolismo del corpo umano	204
9.5	Metabolismo basale e dimensioni degli esseri viventi	206
9.6	Termoregolazione degli animali a sangue caldo	209
9.7	Entropia e vita	212
	► <i>Esercizi e problemi</i>	213

10 Onde meccaniche e acustica

10.1	Perturbazioni e modello ondulatorio	217
10.2	Legge di propagazione delle onde	220
10.3	Interferenza delle onde	225
10.4	Onde stazionarie	227
10.5	Il suono	230
10.6	I caratteri del suono	230
10.7	Cenni sulla fisiologia dell'udito	232
	► <i>Esercizi e problemi</i>	236

11 Ottica

11.1	Natura della luce. Principio di Huygens	237
11.2	Leggi della riflessione e rifrazione	239
11.3	La dispersione della luce e il prisma	242
11.4	Il diottro	243
11.5	Le lenti sottili	246
11.6	L'interferenza della luce	250
11.7	La diffrazione della luce	254
11.8	Funzionamento dell'occhio come sistema ottico centrato	256
11.9	Acuità visiva	259
11.10	Difetti di convergenza e lenti correttive	261
11.11	Visione cromatica	263
	► <i>Esercizi e problemi</i>	265

12 Strumenti ottici

12.1	Microscopio semplice e composto e relativo ingrandimento	267
12.2	Il potere risolutivo del microscopio	271
12.3	Microscopio a contrasto di fase e microscopio polarizzatore	273
	► <i>Esercizi e problemi</i>	276

13 Elettromagnetismo

13.1	Introduzione	277
13.2	La carica elettrica	277
13.3	La legge di Coulomb. Principio di sovrapposizione	279
13.4	Il campo elettrico. Linee di campo	282
13.5	Flusso di campo elettrico. Teorema di Gauss	289
13.6	Energia potenziale elettrica e potenziale elettrico	293
13.7	Potenziale di dipolo elettrico	296
13.8	Conduttori e isolanti. I condensatori	299
13.9	La corrente elettrica continua	309
13.10	Resistenza elettrica e legge di Ohm	310
13.11	Forza elettromotrice e circuiti in corrente continua	316
13.12	Effetto termico della corrente	322
13.13	Conduttori elettrolitici. Elettrolisi	326
13.14	Elettroforesi	329
13.15	Il campo magnetico	330
13.16	La forza di Lorentz e il moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme	337
13.17	Campo magnetico generato da un solenoide	343
13.18	Teorema di Ampere	344
13.19	Induzione elettromagnetica	346
13.20	Coefficiente di autoinduzione. Circuito R - L	348
13.21	Carica e scarica di un condensatore. Circuito R - C	351
	► <i>Esercizi e problemi</i>	354

14 Materia e radiazione

14.1	Spettro delle onde elettromagnetiche	359
14.2	Cenni sulla struttura atomica e sulla teoria dei quanti	361
14.3	Assorbimento ed emissione delle onde elettromagnetiche	364
14.4	Raggi ultravioletti	367
14.5	I raggi X e i principi della radiologia	368
14.6	Struttura dei nuclei. Isotopi naturali	372
14.7	Radiazioni α , β e γ . Radioattività	374
14.8	Legge di decadimento radioattivo	376
14.9	Effetto biologico delle radiazioni ionizzanti. Dosimetria	378
14.10	Utilizzo delle radiazioni ionizzanti in medicina	381
	► <i>Esercizi e problemi</i>	383

15 I potenziali bioelettrici

15.1	Generalità sui potenziali bioelettrici	385
15.2	Potenziale di riposo della membrana	387
15.3	Condizioni di equilibrio ed equazione di Nernst	390
15.4	Pompa sodio-potassio	394
15.5	Equilibrio di Donnan-Gibbs e potenziale di membrana	396
15.6	Proprietà di cavo dell'assone	397
15.7	Potenziale d'azione: generazione e propagazione	403
	► <i>Esercizi e problemi</i>	407

Appendici

A Richiami di matematica

A.1	Potenze e logaritmi	409
A.2	Funzioni	410
A.3	Equazioni algebriche e sistemi di equazioni	415
A.4	Trigonometria	417
A.5	Simboli e costanti matematiche	419

VIII Indice generale

B	Cenni di statistica e teoria dell'errore			
B.1	Curva di distribuzione delle frequenze	420	B.5	Probabilità e frequenza 425
B.2	Valor medio e deviazione standard	422	B.6	Correlazione semplice 426
B.3	Curva di distribuzione normale o di Gauss	423	C	Costanti fisiche e unità di misura 428
B.4	Curva di distribuzione degli errori di misura	425	D	Soluzione di alcuni problemi 431
			Indice analitico	461

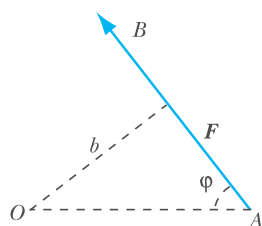
STATICA

4.1 Le forze

Il concetto di forza è stato introdotto nel capitolo precedente come la causa di un cambiamento dello stato di moto di un corpo o di una deformazione del corpo stesso. Si ricordi che le forze sono tipiche grandezze fisiche vettoriali e quindi ad esse si applicano le regole del calcolo vettoriale accennate nel capitolo precedente. Nella statica si considerano i vettori forza con il loro punto di applicazione su un punto materiale, su un sistema di punti materiali o un corpo rigido e si studiano le condizioni per le quali non si genera moto, cioè si ha equilibrio. Per quanto riguarda le unità di misura per le forze, esse vengono definite basandosi sull'effetto dinamico prodotto dalle forze stesse come discusso nel capitolo precedente. Limitatamente alla statica, è possibile utilizzare come unità di misura per le forze il chilogrammo peso o il grammo peso.

4.2 Il momento di una forza

Prima di considerare le condizioni di equilibrio dei corpi si introduce la definizione di *momento di una forza*. Sia data una forza $\mathbf{F} = (\mathbf{B} - \mathbf{A})$ e un punto O come mostrato in Figura 4.1.



◀ FIGURA 4.1

▲ **Figura 4.1** Schema di una forza applicata e dei parametri in gioco per il calcolo del momento di una forza.

Sommario

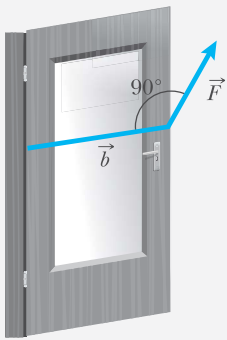
- 4.1 Le forze
- 4.2 Il momento di una forza
- 4.3 Condizioni di equilibrio traslazionale e rotazionale
- 4.4 Composizione di forze parallele: il baricentro
- 4.5 Alcuni esempi di statica del corpo umano

Si definisce momento della forza \mathbf{F} rispetto al punto O il vettore \mathbf{M} ottenuto facendo il prodotto vettoriale della forza \mathbf{F} con il vettore $\mathbf{A-O}$.

■ 4.1

$$\mathbf{M} = (\mathbf{A-O}) \times \mathbf{F} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (\mathbf{r} = \mathbf{A-O})$$

Il modulo del vettore M è dato da $F \cdot OA \cdot \sin \varphi = F \cdot b$, dove si indica con b la distanza del punto O dalla retta di azione della forza F ; b prende il nome di *braccio della forza* rispetto al punto O .

ESEMPIO 4.1

Una porta che si apre in senso antiorario, viene aperta applicando una forza di intensità pari a 25 N. Nell'ipotesi che la porta sia larga 50 cm, calcolare il momento della forza applicata.

Soluzione

Il momento della forza applicata è:

$$M = F \cdot b = 25 \text{ N} \cdot 0.50 \text{ m} = 12.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Con segno positivo in quanto la porta si apre in senso antiorario.

4.3 Condizioni di equilibrio traslazionale e rotazionale

Si prendano in considerazione le condizioni di equilibrio di un punto materiale sottoposto a più forze e di un corpo non puntiforme ma supposto rigido, cioè non deformabile, sotto l'azione delle forze ad esso applicate. Un punto materiale è in equilibrio se la somma vettoriale di tutte le forze applicate al punto dà luogo ad una risultante nulla, cioè ad una forza di modulo zero:

■ 4.2

$$\sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{R} = 0$$

Nel caso invece di un corpo avente dimensioni finite, la condizione (4.2) non è più sufficiente per assicurare l'equilibrio del corpo. Alla condizione (4.2) bisogna aggiungere la condizione che la risultante dei momenti di tutte le forze applicate al corpo rispetto ad un punto qualsiasi O sia pure nulla:

■ 4.3

$$\sum_i \mathbf{M}_i = \mathbf{M}_T = 0$$

Nel caso particolare in cui il corpo rigido sia vincolato in un punto, la condizione di equilibrio può essere semplificata. Infatti, la risultante delle forze applicate al corpo, qualsiasi essa sia, potrà sempre essere equilibrata dalla reazione del vincolo. Questo significa semplicemente che se il corpo è vincolato in un punto, la condizione di equilibrio rispetto ad un moto traslatorio è automaticamente soddisfatta purché i vincoli non si rompano. Pertanto condizione necessaria e

sufficiente per l'equilibrio di un corpo vincolato in un punto O è che la somma dei momenti delle forze rispetto al punto O sia nulla.

Seguono ulteriori considerazioni allo scopo di chiarire il significato e l'utilizzo nella pratica delle condizioni di equilibrio (4.2) e (4.3). Si consideri innanzitutto un problema di equilibrio traslazionale quale si incontra per esempio quando un corpo ha dimensioni quasi puntiformi o quando interessi solamente studiare il moto del baricentro di un corpo rigido. La condizione dell'equilibrio traslazionale (4.2) è un'equazione vettoriale e può essere sempre risolta con un metodo grafico utilizzando le regole del calcolo vettoriale esposte nel primo capitolo. Tuttavia, volendo risolvere il problema per via analitica si può trasformare l'equazione vettoriale in tre equazioni scalari proiettando la (4.2) sui tre assi di un sistema di riferimento opportunamente scelto. Per esempio si supponga di avere un oggetto di peso p posto su un piano inclinato di un angolo α rispetto all'orizzontale. Qual è la forza che bisogna applicare nella direzione del piano inclinato per mantenere il corpo in equilibrio? Come si vede nella Figura 4.2 le forze applicate al corpo sono: la forza peso p diretta lungo la verticale, la reazione vincolare V che è normale al piano di appoggio se si suppone il piano privo di attrito e la forza incognita F diretta lungo il piano inclinato. La condizione di equilibrio (4.2) diventa in questo caso:

$$\mathbf{F} + \mathbf{V} + \mathbf{p} = \mathbf{0}$$

Per risolvere quest'equazione analiticamente la si proietta su un sistema di assi cartesiani ortogonali x, y , indicato nella Figura 4.2. Si osservi che, avendo supposto che le tre forze siano complanari, è sufficiente usare un sistema di due assi cartesiani. Le condizioni di equilibrio che si ottengono per le componenti delle forze sono:

$$F_x + V_x + p_x = 0$$

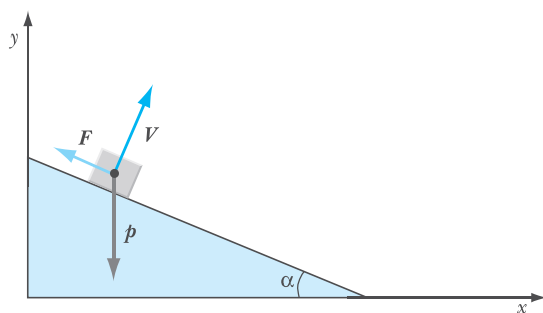
$$F_y + V_y + p_y = 0$$

Poiché, come si ricava facilmente osservando la Figura 4.2, valgono le seguenti relazioni: $F_x = -F \cos \alpha$, $F_y = F \sin \alpha$, $V_x = V \sin \alpha$, $V_y = V \cos \alpha$, $p_x = 0$, $p_y = -p$, si ottiene un sistema di due equazioni:

$$F \cos \alpha - V \sin \alpha = 0 \quad (\text{lungo l'asse } x)$$

$$F \sin \alpha + V \cos \alpha - p = 0 \quad (\text{lungo l'asse } y)$$

nelle due incognite F e V . Ricavando V dalla prima equazione, sostituendola nella seconda e ricordando che $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ si ottiene $F = p \sin \alpha$. Il risultato,



◀ FIGURA 4.2

▲ **Figura 4.2** Corpo su un piano inclinato senza attrito, soggetto ad una forza F che lo mantiene in equilibrio traslazionale.

in questo caso facilmente intuibile, è che la forza F da applicare deve essere di intensità pari alla componente del peso nella direzione del piano inclinato. La componente del peso normale al piano inclinato è annullata dalla reazione vincolare $V = p \cos \alpha$.

ESEMPIO 4.2

Un trampolino lungo 5 m, di massa trascurabile, è sostenuto da due pilastri. Un pilastro si trova all'estremo sinistro del trampolino, il secondo è 2.5 m più avanti. Quali forze esercitano i pilastri nel caso in cui un tuffatore di 90 kg è fermo sull'estremo destro del trampolino?

Soluzione

È chiaro dalla figura che il primo pilastro su cui è ancorato il trampolino esercita una trazione e quindi la reazione vincolare R_1 è diretta verso il basso mentre il secondo pilastro su cui il trampolino poggia esercita una reazione vincolare dovuta alla compressione R_2 diretta in senso opposto quindi verso l'alto. Dalla condizione di equilibrio rotazionale del trampolino rispetto al punto A di appoggio del secondo pilastro si deduce che i momenti delle due forze R_1 e P devono essere uguali in modulo e direzione ma di verso opposto. Le direzioni sono effettivamente uguali e i versi sono opposti perché le forze R_1 e P tendono a far ruotare il trampolino in versi opposti. Quindi basta uguagliare i moduli:

$$R_1 \times 2.5 = mg \times 2.5$$

da cui si ricava

$$R_1 = mg = 883 \text{ N}$$

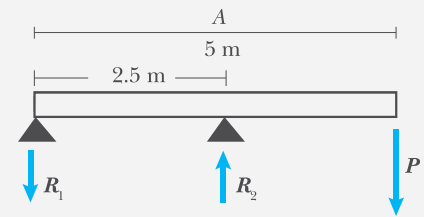
Per l'equilibrio traslazionale si deve imporre la condizione che la somma delle proiezioni delle forze lungo un asse verticale y sia nulla (lungo l'asse orizzontale x le proiezioni sono comunque nulle). Orientando l'asse y verso l'alto si ottiene:

$$-R_1 + R_2 - mg = 0,$$

da cui si ricava per il modulo di R_2 :

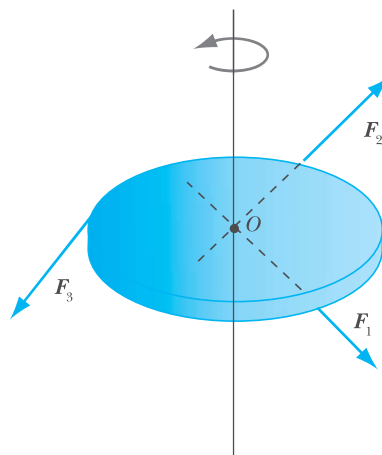
$$R_2 = R_1 + mg = 2 mg = 1766 \text{ N}$$

Le lunghezze e i versi delle reazioni vincolari R_1 e R_2 nella figura sono stati disegnati in conformità con la soluzione anche se a priori non erano noti.



Si consideri ora un esempio di equilibrio rotazionale. Si supponga di avere un disco fissato ad un asse normale al disco stesso e passante per il suo centro. In questo caso la condizione di equilibrio traslazionale è automaticamente soddisfatta dalla presenza del vincolo, mentre bisogna verificare che sia soddisfatta la condizione di equilibrio dei momenti (4.3). Qualsiasi forza applicata al disco in direzione tale che la retta d'azione passi per il punto di vincolo ha momento nullo rispetto a tale punto e pertanto non ha effetto sul moto del disco (si vedano le forze F_1 e F_2 nella Figura 4.3).

Viceversa una forza F_3 applicata tangenzialmente al disco determina una rotazione intorno all'asse normale al disco. Intuitivamente, per equilibrare la forza



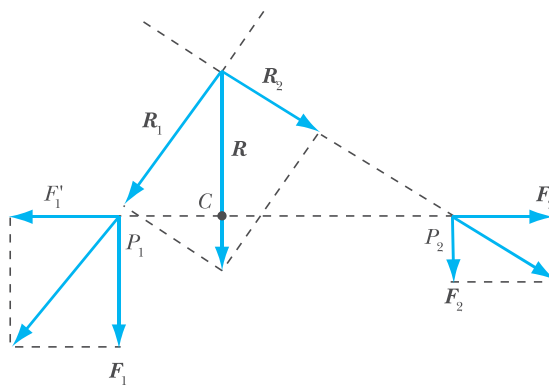
◀ FIGURA 4.3

▲ **Figura 4.3** Disco ruotante attorno ad un asse passante per il suo centro e perpendicolare alla sua superficie, soggetto a tre forze: F_3 con momento diverso da zero e F_1 ed F_2 con momento nullo.

F_3 , bisogna applicare una forza F_4 la quale tenda a generare una rotazione intorno allo stesso asse, ma di verso contrario. L'asse intorno a cui tende a ruotare il disco sotto l'azione della forza F_3 coincide con la direzione del vettore momento della forza F_3 rispetto al punto O . Volendo equilibrare la forza F_3 con un'altra forza F_4 è necessario che i due momenti siano diretti nella stessa direzione (cioè che l'asse di rotazione sia lo stesso), che i versi siano opposti (rotazioni in senso opposto) e che i moduli dei momenti siano uguali. In generale, per risolvere un problema di equilibrio rotazionale si procede come indicato nell'esempio della Figura 4.3 salvo che, invece di operare su un'equazione che mette in relazione i vettori forze, bisogna operare sui vettori momento delle forze stesse.

4.4 Composizione di forze parallele: il baricentro

Siano date due forze F_1 e F_2 parallele e concordi. Per costruire la risultante R delle due forze è possibile ricorrere ad un artificio che permetta di sostituire alle due forze parallele due forze concorrenti in un punto e di cui quindi si sappia costruire la risultante. L'artificio consiste nell'aggiungere due forze F'_1 e F'_2 uguali ed opposte, come mostrato in Figura 4.4.



◀ FIGURA 4.4

▲ **Figura 4.4** Costruzione grafica della risultante di due forze F_1 e F_2 parallele e concordi.

Questo si può sempre fare dato che la risultante delle due forze aggiunte è nulla e quindi il sistema non viene modificato. Si compongono ora le due forze F_1 e F_1' , F_2 e F_2' e si ottengono le risultanti R_1 e R_2 . La risultante delle due forze R_1 e R_2 è a sua volta una forza R che rappresenta quindi la risultante delle due forze parallele e concordi F_1 e F_2 . Come risulta dall'osservazione della Figura 4.4 la risultante R di due forze parallele e concordi F_1 e F_2 è una forza il cui modulo è uguale alla somma dei moduli, la direzione e il verso sono quelli comuni a F_1 e F_2 , mentre il punto di applicazione C è sulla retta r , perpendicolare alla congiungente P_1P_2 delle due forze, retta che divide la congiungente P_1P_2 in parti inversamente proporzionali alle forze stesse:

$$P_1C/P_2C = F_2/F_1$$

In particolare il punto C di intersezione della retta r con P_1P_2 è il punto comune a tutte le rette r che si ottengono facendo ruotare le due forze F_1 e F_2 , mantenendole parallele e concordi. Il punto C viene chiamato *centro delle forze parallele* e può essere quindi considerato come punto di applicazione della risultante R .

La composizione di più di due forze parallele e concordi si può eseguire componendo le forze due a due.

In modo del tutto analogo al caso delle forze parallele e concordi si possono comporre le forze parallele e discordi. La risultante di due forze parallele e discordi F_1 e F_2 è data da una forza R avente come modulo la differenza dei moduli di F_1 e F_2 , come direzione quella comune a F_1 e F_2 e come verso quello della forza maggiore. Il punto di applicazione C divide esternamente la congiungente P_1P_2 in parti inversamente proporzionali alle forze stesse:

$$P_1C/P_2C = F_2/F_1$$

Tuttavia, nel caso che le forze parallele e discordi siano uguali, le due forze non ammettono alcuna risultante. In questo caso si dice che le due forze *costituiscono una coppia*. L'effetto di una coppia è quello di fare ruotare il corpo a cui la coppia è applicata. Per caratterizzare una coppia basta dare il *momento della coppia*, che è un vettore normale al piano delle due forze e avente come modulo il prodotto del modulo F delle forze per la distanza b tra le due forze costituenti la coppia. Il verso del vettore momento della coppia è convenzionale. In generale, si assume il verso piedi-testa di un osservatore che vede la rotazione della coppia in senso antiorario.

Il baricentro

Si consideri un corpo di forma qualsiasi avente dimensioni finite. La forza peso è applicata a tutti i punti del corpo stesso. Si immagini per un momento di scomporre il corpo in tante parti molto piccole. È possibile immaginare che a ciascuna di queste piccole parti sia applicata una forza peso proporzionale alla massa della porzione di corpo considerato e applicata in un punto interno alla porzione stessa. Siccome la forza peso è una forza verticale, è possibile concludere che il sistema di forze peso applicate ai vari punti di un corpo costituisce un sistema di forze parallele e concordi. La risultante di questo sistema di forze rappresenta il peso totale del corpo, mentre il centro del sistema di forze parallele costituisce il baricentro.

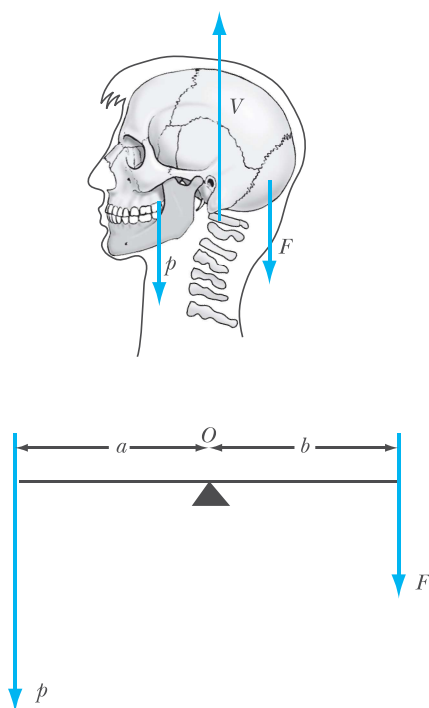
Dato quindi un corpo pesante si può in generale tener conto del sistema di forze peso applicate al corpo considerando semplicemente il peso totale del corpo applicato nel baricentro.

Un corpo materiale sottoposto alla sola forza peso sarà in equilibrio solo se vincolato: per esempio appoggiato ad un piano orizzontale o sospeso in un punto.

Premesso questo lo studente può esercitarsi a riflettere sulle condizioni di equilibrio di un corpo pesante.

4.5 Alcuni esempi di statica del corpo umano

Come illustrazione e applicazione dei concetti di statica e delle condizioni di equilibrio introdotte nei paragrafi precedenti, vengono presi in considerazione alcuni esempi di statica del corpo umano. Numerose articolazioni possono essere schematizzate come leve. Da questa schematizzazione si possono trarre interessanti deduzioni riguardo all'entità dello sforzo muscolare necessario per compiere certi esercizi o semplicemente per mantenere il corpo umano in certe posizioni di equilibrio, oppure riguardo agli sforzi compressionali che si esercitano sulle articolazioni. Si ricordi che una *leva* è costituita da *due bracci solidali* fra loro (ad esempio in Figura 4.5 i due tratti *a* e *b*), incernierati per un'estremità a un *fulcro*, in Figura 4.5 rappresentato dal punto *O*, attorno al quale sono liberi di ruotare. I due bracci sono indicati anche come braccio-potenza (dove si applica la forza, o potenza) e braccio-resistenza (dove si applica la forza resistente). Nelle leve di *primo genere* il fulcro si trova fra le due forze, in quelle di *secondo genere* la forza resistente si trova fra fulcro e forza applicata, in quelle di *terzo genere* la forza applicata si trova fra fulcro e forza resistente. Come si vedrà in seguito, ci sono alcune articolazioni che costituiscono delle leve efficaci ed altre invece che sono leve sfavorevoli; così pure ci sono delle articolazioni su cui si esercitano in condizioni di equilibrio sforzi compressionali sorprendentemente elevati. Per *sforzo compressionale* si intende una forza uguale alla reazione vincolare che agisce sull'articolazione, ma di verso opposto. Negli esempi che seguono si indicherà con *V* la reazione vincolare e con *C* lo sforzo compressionale. Valgono le relazioni $V = -C$ e $V = C$.



◀ FIGURA 4.5

▲ Figura 4.5 Equilibrio della testa.

La testa

Nella Figura 4.5 è mostrato uno schizzo del cranio umano e accanto è riportata la leva a cui il cranio può essere assimilato. Il peso p è applicato nel baricentro del capo; con F è stata indicata e si indicherà di seguito la forza che i muscoli nucali devono sviluppare per mantenere il capo in posizione eretta; si indica infine con V la reazione vincolare esercitata dall'articolazione che funziona come fulcro della leva.

La reazione vincolare è ovviamente uguale e di verso opposto alla forza compressionale che agisce sull'articolazione stessa. Le condizioni di equilibrio della leva sono le condizioni generali di equilibrio di un corpo (4.2) e (4.3). Si applichi dapprima la condizione di equilibrio (4.3) relativa ai momenti delle forze. Come si vede dalla Figura 4.5 il modulo del momento della forza peso è $M = pa$, mentre quello della forza muscolare è $M = Fb$. Siccome i due momenti hanno la stessa direzione e verso opposto, affinché la risultante dei due momenti sia nulla basta che sia soddisfatta la relazione:

■ 4.4

$$pa = Fb$$

da cui si deduce che la forza muscolare necessaria per mantenere il capo in posizione eretta è:

$$F = pa/b$$

Come già osservato, la condizione di equilibrio (4.2) riguardante la risultante delle forze è sempre soddisfatta se il corpo è vincolato in un punto come accade nel caso preso in esame. Imponendo che la condizione (4.2) sia soddisfatta è possibile tuttavia calcolare il valore che deve avere la reazione vincolare. Nel caso considerato, essendo le tre forze p , V , F parallele, con p e F concordi e V discorde, affinché la risultante sia nulla basta che sia soddisfatta la relazione:

■ 4.5

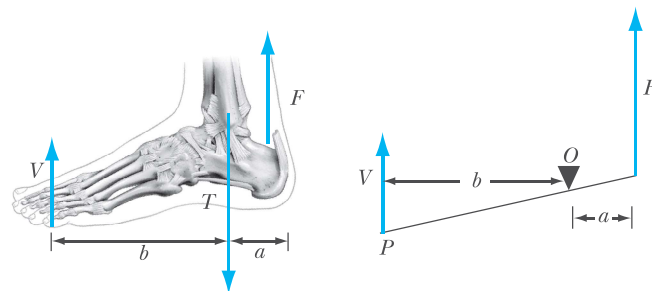
$$F + p = V$$

da cui si può ottenere il valore dello sforzo compressionale che agisce sull'articolazione. Si osservi che la (4.5) è la proiezione della (4.2) su un asse parallelo alla direzione comune alle tre forze. Pertanto F , p e V nella (4.5) rappresentano le componenti delle forze che in questo caso coincidono con i moduli.

Il piede

Nella Figura 4.6 sono rappresentati lo schizzo di un piede e la schematizzazione della leva corrispondente. In questo caso si indicano con T la reazione vincolare dell'articolazione e con V la reazione vincolare del piano di appoggio.

FIGURA 4.6 ►



▲ Figura 4.6 Equilibrio interno del piede.

Si osservi innanzitutto che la condizione di equilibrio del corpo nel suo insieme, appoggiato al piano, richiede che il baricentro del corpo sia sulla verticale passante per la superficie di appoggio (si veda la 4.3) e che, per la condizione (4.2), sia:

$$V = -p \quad (p = \text{peso del corpo})$$

È possibile ora considerare l'equilibrio interno dell'articolazione pur di sostituire al piano di appoggio la reazione vincolare V . Imponendo la condizione di equilibrio sui momenti si ottiene:

$$\begin{aligned} Tb &= F(a + b) \\ pb &= Fa \end{aligned}$$

4.6 ■

dove la prima delle (4.6) si ottiene prendendo il punto P come punto di riferimento rispetto a cui calcolare i momenti delle forze, mentre la seconda prendendo come punto di riferimento il punto O .

Come si vede la leva del piede è alquanto sfavorevole. La forza muscolare F necessaria per sollevare il corpo in punta di piede è elevatissima come pure elevatissimo è lo sforzo compressionale sull'articolazione che risulta uguale alla reazione vincolare T , ma di verso opposto. Il movimento di sollevamento in punta di piede è tanto più facile quanto più piccolo è il rapporto b/a .

L'avambraccio

Un'altra leva alquanto sfavorevole è costituita dall'articolazione del gomito che è mostrata in Figura 4.7.

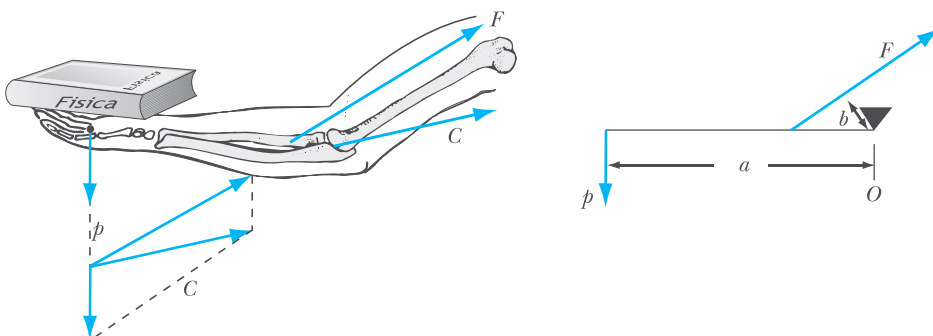
Infatti, come risulta dalla figura, il punto di applicazione della forza muscolare F risulta molto vicino al fulcro O costituito dall'articolazione del gomito. In queste condizioni la forza F necessaria per fare equilibrio ad una forza p (per esempio un corpo sostenuto nella mano) è molto più grande di p :

$$Fb = pa \quad \text{da cui} \quad F = pa/b$$

Per quanto riguarda lo sforzo compressionale C sull'articolazione questo si ottiene dalla condizione:

$$C = p + F$$

Per risolvere quest'equazione vettoriale, quando siano note la forza peso p e la posizione dell'articolazione, basta procedere graficamente come indicato nella Figura 4.7 o, analiticamente, proiettando l'equazione vettoriale su un sistema di assi x e y .



◀ FIGURA 4.7

▲ Figura 4.7 Articolazione del gomito e schema della corrispondente leva.

Il tronco

Si consideri ora la statica di un uomo che si mantiene in posizione eretta. Come si vede dalla Figura 4.8 il baricentro del corpo è, in generale, posto circa all'altezza del ventre e in posizione anteriore rispetto alla spina dorsale. Il tronco poggia sulla spina dorsale e precisamente si può pensare che faccia perno sulla settima vertebra, in modo tale che anche in questo caso si possa schematizzare il problema mediante una leva di primo grado.

FIGURA 4.8 ►



▲ Figura 4.8 Articolazione del tronco e corrispondente schema della leva.

Le due condizioni di equilibrio sono come al solito:

$$Fa = pb$$

$$V = F + p$$

Da queste due condizioni di equilibrio si evince che sia la forza dei muscoli dorsali sia lo sforzo compressionale sulla vertebra sono tanto minori quanto più il baricentro è allineato verticalmente con la spina dorsale. In soggetti obesi, in cui quindi il baricentro è spostato in avanti, le condizioni di equilibrio sono rese più difficili.

Si ricordi infine che la possibilità di trasportare forti carichi sulle spalle o sulla testa risiede principalmente nell'abilità di bilanciare il corpo in modo tale che il sistema costituito dal corpo e dal carico abbia il baricentro allineato verticalmente con la vertebra di appoggio della spina dorsale.

La spalla

Una leva del tutto analoga a quella dell'avambraccio è costituita dall'articolazione della spalla, illustrata nella Figura 4.9.

A. Lascialfari • F. Borsa • A. Gueli

Principi di **Fisica**

per indirizzo biomedico e farmaceutico

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**.

