

Elementi di Meccanica dei Fluidi, Termodinamica e Fisica Statistica

Egidio Landi Degl'Innocenti

Elementi di Meccanica dei Fluidi, Termodinamica e Fisica Statistica

Edizione curata da Roberto Livi
e Luca Del Zanna

 Springer

Egidio Landi Degl'Innocenti
Department of Physics and Astronomy
University of Florence
Florence, Italy

ISBN 978-88-470-3990-2 ISBN 978-88-470-3991-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-88-470-3991-9>

© Springer-Verlag Italia S.r.l., part of Springer Nature 2019

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore e la sua riproduzione è ammessa solo ed esclusivamente nei limiti stabiliti dalla stessa. Le fotocopie per uso personale possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68. Le riproduzioni per uso non personale e/o oltre il limite del 15% potranno avvenire solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, Corso di Porta Romana n. 108, Milano 20122, e-mail segreteria@aidro.org e sito web www.aidro.org.

Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla ristampa, all'utilizzo di illustrazioni e tabelle, alla citazione orale, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla registrazione su microfilm o in database, o alla riproduzione in qualsiasi altra forma (stampata o elettronica) rimangono riservati anche nel caso di utilizzo parziale. La violazione delle norme comporta le sanzioni previste dalla legge.

L'utilizzo in questa pubblicazione di denominazioni generiche, nomi commerciali, marchi registrati, ecc. anche se non specificatamente identificati, non implica che tali denominazioni o marchi non siano protetti dalle relative leggi e regolamenti.

Questa edizione è pubblicata da Springer-Verlag Italia S.r.l., part of Springer Nature
con sede legale in Via Decembrio 28, 20137 Milano, Italia

Alla memoria di Egidio

Prefazione

Questo libro è costituito nella sua quasi totalità da quelle che sono state per molti anni le dispense del corso di Fluidi, Termodinamica e Statistica, tenuto dal compianto Prof. Egidio Landi Degl'Innocenti per gli studenti del corso di laurea triennale in Fisica e Astrofisica presso l'Università degli Studi di Firenze. Nell'ultimo decennio abbiamo svolto esercitazioni e moduli di questo corso assieme ad Egidio e dopo il suo pensionamento, purtroppo seguito a breve dalla sua scomparsa, ci siamo accollati l'onere e l'onore di continuare la sua opera di formazione, cercando per quanto possibile di restare fedeli all'impostazione del suo corso e, in particolare, utilizzando ancora le sue dispense come riferimento pressoché unico per le lezioni.

L'idea di concepire un corso, da tenersi al secondo anno di studi del percorso triennale, che contenesse tutti e tre i temi contenuti nel suo titolo, è sicuramente ambiziosa. Essa nasce dall'esigenza culturale di fornire agli studenti una visione non settoriale di queste materie, che riguardano tutte la fisica dei sistemi composti da un grande numero di particelle. Da un lato per questi sistemi non è più possibile sfruttare le leggi del moto e della dinamica applicate alle singole particelle, come appreso nel corso di base di meccanica (tipicamente tenuto al primo anno), dovendo invece passare alla meccanica dei mezzi continui e al concetto di "campo" (nel caso dei fluidi). Inoltre, dato l'elevato numero di particelle che compongono i sistemi in esame, l'approccio deterministico va abbandonato in favore di quello probabilistico, e vengono introdotti concetti nuovi, e se vogliamo inaspettati per lo studente, quali l'"irreversibilità" nei processi fisici (nel caso della termodinamica statistica).

Lo scopo perseguito da Egidio era dunque proprio quello di una presentazione concettualmente unitaria, indicando anche le connessioni tra ambiti diversi. Ne sono espliciti esempi i richiami alla termodinamica nella parte riguardanti la meccanica dei fluidi, in particolare degli aeriformi, e in quella di fisica statistica. L'altro sforzo compiuto da Egidio è stato quello di fornire argomenti complementari, che possano essere o meno svolti a lezione (a seconda delle ore a disposizione nel corso), molti dei quali sotto forma di "esercizi" che consentano allo studente di affrontare calcoli relativi a concreti problemi di fisica. Questi complementi sono stati ulteriormente estesi in questo libro, riprendendo argomenti che si sono andati ad aggiungere in "itinerare" tramite le esercitazioni svolte nei vari anni nell'ambito del corso stesso. Si

può senza dubbio affermare che Egidio abbia raggiunto gli scopi culturali che si era prefissato, visti gli eccellenti risultati formativi ottenuti con un'impostazione così poco tradizionale e culturalmente ambiziosa.

In varie occasioni di discussione con Egidio sull'impostazione del corso era emersa anche la sua esigenza di introdurre dei cenni storici, in aggiunta alle numerose note disseminate nel corpo principale delle dispense, che potessero contribuire a rafforzarne l'unità culturale. L'idea era di fornire allo studente una guida storica nella quale poter individuare come i concetti fondamentali contenuti nel corso si fossero formati e definiti grazie all'opera e alla collaborazione di generazioni di scienziati. Purtroppo la scomparsa di Egidio ha bloccato sul nascere questo intento e quindi ci siamo sentiti di dover colmare questa lacuna aggiungendo le tre introduzioni storiche, che corredano le tre parti principali del testo. Di queste ci assumiamo tutta la responsabilità, anche se va detto che nella loro redazione abbiamo cercato di restare fedeli all'impostazione che Egidio ci aveva espresso in varie occasioni. Speriamo di esserci riusciti e soprattutto confidiamo che questo libro contribuisca a mantenere viva la testimonianza della elevata qualità di Egidio come docente, sicuramente non inferiore a quella già ampiamente riconosciuta di scienziato e di ricercatore.

Ci auguriamo che questo libro possa essere utilizzato per molti anni dalle future generazioni di studenti del corso di laurea per cui era stato pensato. Le tre parti principali, pur connesse, possono anche essere trattate in un ordine diverso da quello proposto qui (ad esempio la parte di meccanica dei fluidi, dove sono richieste nozioni tipicamente svolte in un corso di Analisi Matematica II, potrebbe essere presentata come ultimo argomento), e ci auguriamo che il testo possa essere adottato anche in altri corsi di laurea, non necessariamente in Fisica, dove anche solo una o due delle tre parti principali (comunque fruibili singolarmente) potrebbero rientrare nel programma di un insegnamento.

Infine, vorremmo ringraziare il nostro collega Lapo Casetti per aver contribuito ad una preziosa rilettura della bozza del libro.

Firenze, Italy
Gennaio 2019

Roberto Livi
Luca Del Zanna

Indice

Parte I Elementi di meccanica dei fluidi

Introduzione storica	3
1 Statica dei fluidi	7
1.1 Definizione di fluido	7
1.2 Il principio di Pascal e la legge fondamentale dell'idrostatica	11
1.3 Distinzione fra liquidi e aeriformi	14
1.4 La legge di Stevino	16
1.5 L'esperienza di Torricelli	18
1.6 Il principio di Archimede e il galleggiamento dei corpi	21
1.7 Fenomeni superficiali e di capillarità	25
2 Dinamica dei fluidi ideali	31
2.1 Cinematica dei fluidi	31
2.2 L'equazione di Eulero	36
2.3 Il teorema di Bernoulli e sue semplici applicazioni	37
2.4 Vorticità, teorema di Kelvin e flusso potenziale	43
2.5 Le onde di pressione	49
2.6 Le onde di gravità	56
3 Dinamica dei fluidi reali	61
3.1 La viscosità e l'equazione di Navier-Stokes	61
3.2 La legge di Poiseuille	66
3.3 Il moto vorticoso	68

Parte II Elementi di termodinamica

Introduzione storica	77
-----------------------------------	----

4	Termometria e calorimetria	81
4.1	La misura della temperatura	81
4.2	Le leggi dei gas e il termometro a gas perfetto	86
4.3	I gas reali e l'equazione di Van der Waals	93
4.4	Calore e capacità termica	98
4.5	La trasmissione del calore	104
5	Termodinamica	111
5.1	Il primo principio della termodinamica	111
5.2	Illustrazioni del primo principio	116
5.3	Calori specifici e trasformazioni adiabatiche di un gas perfetto	119
5.4	Il secondo principio della termodinamica	124
5.5	Le macchine termiche e il teorema di Carnot	125
5.6	Il ciclo di Carnot e la definizione termodinamica di temperatura	129
5.7	La diseguaglianza di Clausius e la definizione di entropia	132
5.8	Illustrazioni del concetto di entropia	137
5.9	Altre conseguenze del primo e secondo principio	140
5.10	Cenni al significato statistico dell'entropia	144
5.11	L'entalpia e i potenziali termodinamici	147
6	Applicazioni tecniche	151
6.1	Le macchine termiche: dal vapore alla combustione interna	151
6.2	Le macchine frigorifere e le pompe di calore	157

Parte III Elementi di fisica statistica

	Introduzione storica	163
7	Fisica cinetica	167
7.1	La teoria cinetica dei gas	167
7.2	La distribuzione Maxwelliana delle velocità	172
7.3	Il cammino libero medio	177
7.4	La distribuzione di Poisson	179
7.5	La distribuzione delle distanze fra particelle	181
7.6	Fenomeni di trasporto	183
7.7	Random-walk e moto Browniano	187
8	Termodinamica statistica	193
8.1	La misura del disordine	193
8.2	Il teorema H	196
8.3	Le leggi generali della termodinamica statistica	197
8.4	Fluttuazioni	203
8.5	Sistemi di particelle indipendenti: il principio di Boltzmann	205
8.6	L'equipartizione dell'energia	207
8.7	L'entropia del gas perfetto	212

Parte IV Complementi

9	Complementi di meccanica dei fluidi	219
9.1	Alcune proprietà geometriche delle superfici chiuse	219
9.2	Il gradiente di una funzione scalare e vettoriale	221
9.3	Il paradosso di Pascal e gli emisferi di Magdeburgo	222
9.4	Soluzione di alcuni problemi di idrostatica	224
9.5	Stabilità al galleggiamento di una trave	231
9.6	Dimostrazione dei teoremi di Gauss e di Kelvin	233
9.7	Flusso potenziale attorno a un ostacolo	238
9.8	Relazione di dispersione generale per le onde di gravità	241
9.9	Flusso viscoso tra due cilindri coassiali rotanti	243
10	Complementi di termodinamica	247
10.1	La dilatazione termica delle sostanze	247
10.2	La costruzione di Maxwell	249
10.3	La diffusione del calore e il teorema di Fourier	250
10.4	L'andamento della temperatura in una sfera cava conduttrice	253
10.5	La temperatura ottimale per il corpo umano	255
10.6	Il gradiente termico nell'atmosfera terrestre	257
10.7	L'esperienza di Rüchardt	259
10.8	L'equazione di Clapeyron	260
10.9	L'energia interna e l'entropia della radiazione di corpo nero	262
10.10	Interdiffusione di due gas	264
10.11	Soluzione di un'equazione formale	266
11	Complementi di fisica statistica	269
11.1	Il teorema del viriale	269
11.2	La teoria cinetica dei gas e l'equazione di Van der Waals	272
11.3	La statistica dei sistemi termodinamici aperti	274
11.4	Le statistiche quantiche	277