

Maurizio Zani

Fisica sperimentale

Meccanica. Termodinamica. Elettromagnetismo

II edizione

*“Only the children
cry...”*

Toto

Prefazione

Questo testo è una raccolta delle lezioni svolte in aula dal sottoscritto in questi anni durante i corsi di Fisica Sperimentale ad Ingegneria presso il Politecnico di Milano. Il testo è organizzato con una sequenza che bene o male segue quella tenuta in aula.

Lungi da me pensare che il testo sia esaustivo, e che consenta di evitare di frequentare le lezioni in aula; è invece uno strumento complementare, che può aiutare a seguire più agevolmente le tematiche proposte, con il supporto di avere sott'occhio i procedimenti seguiti in aula.

Consigli: nel testo sono contenuti degli esercizi d'esempio per le diverse tematiche, evidenziati con un segno a lato come il seguente

| Esercizio d'esempio

E' comunque importante che di ogni tematica trattata si capisca l'ambito di validità, così da poterla applicare ai vari casi che si presentano e non fermandosi ai soli esempi presentati.

Ogni termine o definizione importante compare in **grassetto** nel testo, e viene poi riportato per comodità nell'indice degli argomenti a fondo libro; è presente anche un indice degli autori richiamati nel testo, un indice delle costanti ed un indice delle unità di misura.

Errori: ne è piena la Terra, figurarsi qui dentro!! Che dire, vi sarei grato, e con me gli studenti futuri, se voleste segnalarmeli, così che questo strumento possa essere continuamente migliorato nelle successive edizioni (maurizio.zani@polimi.it)

Ringraziamenti: mi fa piacere cominciare a ringraziare proprio gli studenti, dai quali molte volte ho preso ispirazione per cercare nuovi esempi che chiarissero la tematica, per continuare con i colleghi con i quali ho condiviso il compito di docente e dai quali ho appreso utili consigli per il compito dell'insegnamento.

Ora basta essere così seri (chi ha seguito le mie lezioni sa a cosa mi riferisco): prendete carta, penna e calamaio e... buon lavoro!



Maurizio Zani

Luglio, 2020

Sommario

Metrologia	17
Metodo sperimentale.....	17
<i>Scienza</i>	<i>17</i>
<i>Fisica.....</i>	<i>19</i>
Grandezze fisiche.....	21
<i>Unità di misura</i>	<i>21</i>
<i>Grandezze fondamentali e derivate</i>	<i>23</i>
<i>Grandezze adimensionali.....</i>	<i>25</i>
<i>Sistemi di unità di misura</i>	<i>26</i>
<i>Conversioni di unità</i>	<i>27</i>
<i>Operazioni tra grandezze con unità</i>	<i>28</i>
<i>Analisi dimensionale.....</i>	<i>29</i>
Notazione	30
<i>Notazione scientifica.....</i>	<i>30</i>
<i>Notazione ingegneristica</i>	<i>31</i>
Errori e cifre significative	32
<i>Errore sistematico.....</i>	<i>32</i>
<i>Errore statistico</i>	<i>32</i>
<i>Propagazione degli errori</i>	<i>35</i>
<i>Cifre significative.....</i>	<i>36</i>
<i>Arrotondamenti.....</i>	<i>37</i>
Cinematica del punto.....	39
Cinematica scalare	39
<i>Sistema di riferimento.....</i>	<i>39</i>
<i>Posizione</i>	<i>40</i>
<i>Velocità</i>	<i>44</i>
<i>Accelerazione.....</i>	<i>50</i>
<i>Moto del grave.....</i>	<i>58</i>
<i>Moto armonico.....</i>	<i>60</i>
Cinematica vettoriale	62
<i>Posizione</i>	<i>62</i>
<i>Velocità</i>	<i>67</i>
<i>Accelerazione.....</i>	<i>72</i>
<i>Moto del proiettile</i>	<i>80</i>
<i>Moto piano</i>	<i>83</i>
Dinamica del punto.....	87
Primo principio della dinamica	87
<i>Sistema di riferimento inerziale.....</i>	<i>89</i>
Secondo principio della dinamica	90
<i>Forza</i>	<i>90</i>
<i>Massa</i>	<i>92</i>
<i>Struttura della materia</i>	<i>95</i>
<i>Problema fondamentale della dinamica.....</i>	<i>96</i>
<i>Quantità di moto</i>	<i>98</i>
Terzo principio della dinamica	101
<i>Reazioni vincolari.....</i>	<i>101</i>
<i>Azione e reazione</i>	<i>102</i>
Grandezze angolari	104
<i>Momento della forza.....</i>	<i>104</i>
<i>Momento d'inerzia.....</i>	<i>104</i>
<i>Momento angolare.....</i>	<i>105</i>

Statica del punto.....	108
<i>Equilibrio</i>	108
<i>Forze</i>	108
Esempi di forze.....	111
Forza d'inerzia	111
Peso.....	112
Appoggio	113
Forza d'attrito	115
<i>Attrito radente</i>	115
<i>Attrito volvente</i>	120
<i>Attrito viscoso</i>	121
Tensione.....	123
<i>Filo ideale</i>	123
<i>Filo reale</i>	125
<i>Carrucola</i>	125
Forza elastica	126
<i>Moto armonico libero</i>	128
<i>Moto armonico smorzato</i>	133
<i>Moto armonico forzato</i>	137
Meccanica relativa.....	139
Cinematica relativa	139
<i>Posizione</i>	140
<i>Velocità</i>	141
<i>Accelerazione</i>	144
Dinamica relativa	146
<i>Forze apparenti</i>	146
<i>Sistemi inerziali</i>	147
<i>Sistemi non inerziali</i>	148
Statica relativa.....	149
Meccanica relativistica.....	151
Metrologia relativistica	151
<i>Misure indipendenti</i>	152
<i>Simultaneità</i>	153
<i>Lunghezza trasversale</i>	155
<i>Intervallo di tempo</i>	156
<i>Lunghezza longitudinale</i>	158
Cinematica relativistica.....	160
<i>Cinematica inerziale relativa</i>	160
<i>Cinematica inerziale relativistica</i>	161
Principi di relatività.....	162
<i>Principi semplici</i>	162
<i>Principi speciali</i>	162
<i>Principi generali</i>	162
Relazioni integrali.....	163
Impulso	163
<i>Impulso</i>	163
<i>Impulso angolare</i>	165
Lavoro e potenza.....	166
<i>Lavoro</i>	166
<i>Potenza</i>	169
Energia.....	170

<i>Energia cinetica</i>	170
<i>Energia potenziale</i>	173
<i>Statica del punto</i>	179
<i>Energia meccanica</i>	182
Principi di conservazione.....	184
Meccanica dei sistemi.....	185
Cinematica dei sistemi.....	185
<i>Centro di massa</i>	185
<i>Densità</i>	188
Dinamica dei sistemi.....	191
<i>Quantità di moto</i>	191
<i>Momento angolare</i>	193
<i>Equazioni cardinali</i>	196
Dinamica relativa dei sistemi.....	197
<i>Sistema di riferimento del centro di massa</i>	197
<i>Primo teorema di König</i>	198
<i>Secondo teorema di König</i>	199
Relazioni integrali.....	200
<i>Impulso</i>	200
<i>Impulso angolare</i>	202
<i>Energia cinetica</i>	204
<i>Energia potenziale</i>	205
<i>Energia propria</i>	206
<i>Energia interna</i>	207
<i>Principi di conservazione</i>	208
Urti.....	209
<i>Urti elastici</i>	211
<i>Urti anelastici</i>	216
Gravitazione.....	221
Cinematica gravitazionale.....	221
<i>Prima legge di Kepler</i>	223
<i>Seconda legge di Kepler</i>	227
<i>Terza legge di Kepler</i>	228
Dinamica gravitazionale.....	229
<i>Forza gravitazionale</i>	229
<i>Massa gravitazionale</i>	232
<i>Campo gravitazionale</i>	233
<i>Energia potenziale gravitazionale</i>	234
Orbite planetarie.....	236
<i>Energia potenziale efficace</i>	236
<i>Energia totale</i>	238
Meccanica dei solidi.....	239
Meccanica dei sistemi numerosi.....	239
<i>Approccio statistico</i>	239
<i>Stati della materia</i>	240
Statica del corpo rigido.....	241
<i>Equazioni cardinali</i>	241
Proprietà elastiche.....	242
<i>Trazione</i>	242
<i>Compressione</i>	247
<i>Compressione idrostatica</i>	248
<i>Taglio</i>	249
<i>Legge di Poisson</i>	250

Modello atomico	252
Meccanica dei fluidi.....	255
Proprietà meccaniche	255
<i>Densità</i>	255
<i>Pressione</i>	257
<i>Taglio</i>	258
Proprietà elastiche.....	259
<i>Compressione idrostatica</i>	259
<i>Taglio</i>	260
Statica dei fluidi	266
<i>Equazione della statica dei fluidi</i>	266
<i>Legge di Stevin</i>	270
<i>Principio di Pascal</i>	273
<i>Principio di Archimede</i>	276
<i>Pressione atmosferica</i>	281
<i>Equazione barometrica</i>	286
Fenomeni di superficie.....	287
<i>Tensione superficiale</i>	287
<i>Legge di Laplace</i>	289
<i>Tensione interfacciale</i>	292
<i>Capillarità</i>	295
<i>Modello atomico</i>	296
Cinematica dei fluidi	297
<i>Descrizione lagrangiana</i>	297
<i>Descrizione euleriana</i>	297
<i>Moto stazionario</i>	298
Dinamica dei fluidi ideali.....	299
<i>Equazione di continuità</i>	299
<i>Legge di Leonardo</i>	300
<i>Principio di Bernoulli</i>	302
<i>Principio di Torricelli</i>	308
Dinamica dei fluidi viscosi	310
<i>Moto laminare</i>	310
<i>Moto turbolento</i>	313
<i>Attrito viscoso</i>	315
<i>Portanza</i>	316
<i>Effetto Magnus</i>	317
Termologia	319
Sistema termodinamico.....	319
<i>Sistema e ambiente</i>	319
<i>Grandezze termodinamiche</i>	320
<i>Regola delle fasi</i>	321
<i>Pressione</i>	321
<i>Mole</i>	322
Principio zero della termodinamica	324
<i>Equilibrio termodinamico</i>	324
<i>Principio zero della termodinamica</i>	325
<i>Temperatura</i>	326
<i>Scale di temperatura</i>	327
<i>Termometri</i>	332
Dilatazione termica	334
<i>Dilatazione lineare</i>	334
<i>Dilatazione cubica</i>	336
<i>Modello atomico</i>	339
Primo principio della termodinamica.....	340

<i>Lavoro termodinamico</i>	340
<i>Calore</i>	342
<i>Equivalente meccanico della caloria</i>	343
<i>Energia interna</i>	344
<i>Primo principio della termodinamica</i>	346
Trasformazioni termodinamiche	349
<i>Quasi statica</i>	349
<i>Reversibile</i>	349
<i>Isobara</i>	350
<i>Isocora</i>	350
<i>Isoterma</i>	350
<i>Adiabatica</i>	351
Calore specifico	352
<i>Capacità termica</i>	352
<i>Calore specifico</i>	353
<i>Calore specifico molare</i>	355
Transizioni di fase	356
<i>Calore latente</i>	356
<i>Diagramma pT</i>	359
<i>Diagramma pV</i>	361
Trasmissione del calore	362
<i>Conduzione</i>	362
<i>Convezione</i>	365
<i>Irraggiamento</i>	366
Meccanica dei gas	371
Gas ideale	371
<i>Legge di Avogadro</i>	371
<i>Legge di Charles</i>	372
<i>Legge di Gay-Lussac</i>	374
<i>Legge di Boyle-Mariotte</i>	375
<i>Equazione di stato dei gas</i>	376
<i>Legge di Dalton</i>	378
<i>Esperimento di Joule</i>	379
<i>Relazione di Mayer</i>	381
Teoria cinetica	382
<i>Modello atomico</i>	382
<i>Pressione</i>	383
<i>Temperatura</i>	385
<i>Energia interna</i>	386
<i>Teorema di equipartizione dell'energia</i>	387
<i>Calore specifico</i>	389
Gas reale	391
<i>Sviluppo del viriale</i>	391
<i>Equazione di Van der Waals</i>	392
Trasformazioni termodinamiche	395
<i>Isobara</i>	395
<i>Isocora</i>	395
<i>Isoterma</i>	395
<i>Adiabatica</i>	395
<i>Politropica</i>	398
Termodinamica	403
Cicli termodinamici	403
<i>Macchina termica</i>	403
<i>Macchina frigorifera</i>	405
<i>Ciclo di Carnot</i>	406
<i>Ciclo Stirling</i>	409

Ciclo Otto.....	411
Ciclo Diesel.....	413
Pompa di calore.....	415
Secondo principio della termodinamica.....	416
Irreversibilità.....	416
Enunciato di Kelvin-Planck.....	417
Enunciato di Clausius.....	419
Teorema di Carnot.....	421
Equazione di Clapeyron.....	423
Scala termodinamica assoluta.....	425
Teorema di Clausius.....	426
Entropia.....	428
Principio di aumento dell'entropia.....	433
Energia degradata.....	435
Terzo principio della termodinamica.....	438
Terzo principio della termodinamica.....	438
Ipotesi di Nernst-Planck.....	439
Elettrostatica.....	441
Elettrizzazione.....	441
Strofinio.....	442
Contatto.....	443
Induzione elettrostatica.....	444
Polarizzazione.....	445
Forza elettrica.....	446
Carica elettrica.....	446
Struttura della materia.....	449
Forza di Coulomb.....	453
Carica esploratrice.....	457
Campo elettrico.....	458
Campo elettrico.....	458
Linee di flusso.....	464
Tubo di flusso.....	465
Moto di cariche.....	466
Teorema di Gauss.....	467
Flusso.....	467
Superficie sferica.....	469
Superficie generica.....	471
Campo conservativo.....	476
Energia potenziale elettrica.....	476
Potenziale elettrico.....	479
Energia elettrica.....	481
Dipolo elettrico.....	487
Interazioni create.....	487
Interazioni subite.....	489
Sviluppo in multipoli.....	491
Materiali conduttori.....	497
Conduttore pieno.....	497
Conduttore carico.....	497
Teorema di Coulomb.....	499
Pressione elettrostatica.....	500
Conduttore in campo esterno.....	502
Conduttori a contatto.....	503
Conduttore cavo.....	505
Conduttore carico.....	505
Carica nella cavità.....	506
Conduttore in campo esterno.....	507

Capacità elettrica.....	508
Energia elettrica	509
Condensatori.....	511
Capacità	511
<i>Condensatore piano</i>	512
<i>Condensatore cilindrico</i>	515
<i>Condensatore sferico</i>	517
Energia elettrica	518
Serie e parallelo.....	520
<i>Condensatori in serie</i>	520
<i>Condensatori in parallelo</i>	520
Mutua capacità.....	521
Materiali dielettrici.....	523
Materiali dielettrici.....	523
<i>Condensatore piano</i>	523
<i>Lastra conduttrice</i>	524
<i>Lastra dielettrica</i>	525
Polarizzazione	528
<i>Polarizzazione (fenomeno)</i>	528
<i>Polarizzazione (vettore)</i>	531
<i>Induzione elettrica</i>	532
<i>Condensatori in parallelo</i>	534
<i>Richiamo del dielettrico</i>	536
Corrente elettrica.....	539
Corrente	539
Densità di corrente	541
Conservazione della carica.....	544
<i>Equazione di continuità</i>	544
<i>Fenomeni stazionari</i>	545
<i>Fenomeni non stazionari</i>	546
Resistori.....	547
Resistenza elettrica.....	547
<i>Prima legge di Ohm</i>	547
<i>Seconda legge di Ohm</i>	548
<i>Legge di Ohm infinitesima</i>	550
<i>Codice colori</i>	551
Modello di Drude.....	552
<i>Modello di Drude</i>	552
<i>Velocità termica</i>	553
<i>Velocità di deriva</i>	554
Legge di Joule	556
Serie e parallelo.....	558
<i>Resistori in serie</i>	558
<i>Resistori in parallelo</i>	558
Superconduttori.....	559
<i>Classificazione</i>	559
Circuiti elettrici continui.....	561
Generatori	561
<i>Generatore ideale</i>	561

Generatore reale.....	564
Tipi di generatore.....	566
Leggi di Kirchhoff.....	567
Prima legge di Kirchhoff.....	567
Seconda legge di Kirchhoff.....	568
Strumenti di misura.....	569
Amperometro.....	569
Voltmetro.....	569
Multimetro.....	569
Magnetostatica.....	571
Magnetizzazione.....	571
Magnetizzazione.....	571
Forza magnetica.....	572
Linee di flusso.....	574
Campo magnetico.....	575
Forza magnetica.....	576
Forza di Lorentz.....	576
Moto di cariche.....	578
Effetto Hall.....	582
Seconda legge elementare di Laplace.....	583
Campo magnetico.....	585
Campo magnetico.....	585
Prima legge elementare di Laplace.....	587
Forza tra correnti.....	589
Teorema di Gauss.....	590
Teorema di Ampère.....	591
Linea circolare.....	591
Linea generica.....	592
Dipolo magnetico.....	599
Dipolo magnetico.....	599
Spira circolare.....	601
Spira rettangolare.....	603
Teorema di equivalenza di Ampère.....	605
Magnetone di Bohr.....	606
Induzione elettromagnetica.....	607
Legge di Faraday-Henry.....	607
Legge di Lenz.....	609
Induzione di movimento.....	610
Induzione di trasformazione.....	611
Correnti di Foucault.....	612
Induttori.....	613
Induttanza.....	613
Solenoidi.....	614
Energia magnetica.....	618
Serie e parallelo.....	620
Induttori in serie.....	620
Induttori in parallelo.....	620
Mutua induttanza.....	621
Materiali magnetici.....	623
Materiali magnetici.....	623
Solenoidi.....	623

<i>Cilindro magnetico</i>	624
Magnetizzazione	625
<i>Magnetizzazione (fenomeno)</i>	625
<i>Magnetizzazione (vettore)</i>	628
<i>Induzione magnetica</i>	629
Circuiti elettrici variabili	631
Circuiti in transitorio	631
<i>Carica e scarica del condensatore</i>	631
<i>Carica e scarica dell'induttore</i>	637
Circuiti oscillanti	641
<i>Oscillatore ideale</i>	641
<i>Oscillatore reale smorzato</i>	642
<i>Oscillatore reale forzato</i>	643
Elettromagnetismo	647
Relatività	647
<i>Fisica classica</i>	648
<i>Fisica relativistica</i>	649
Equazioni di Maxwell	651
<i>Induzione magnetoelettrica</i>	652
<i>Equazioni di Maxwell</i>	654
Bibliografia	655
Indice	657
Indice degli autori	657
Indice delle costanti	659
Indice delle unità di misura	660
Indice degli argomenti	661