

**Luciano Mistura, Nicola Sacchetti**

**PROBLEMI  
DI FISICA**

---

**Luciano Mistura, Nicola Sacchetti**

**PROBLEMI**  
**DI**  
**FISICA**  
**ELETTROMAGNETISMO**  
**E OTTICA**

---

**EDIZIONI KAPPA**

## PREFAZIONE

Questo libro ha la pretesa (speriamo ben giustificata) di non essere una semplice raccolta di esercizi sull'elettromagnetismo bensì una guida per come affrontare e risolvere i problemi tipicamente proposti all'esame scritto di Fisica II dei corsi di laurea di Ingegneria, Matematica e Chimica. Esso si basa esclusivamente sugli esercizi d'esame relativi ai corsi di Ingegneria dell'Università di Roma "La Sapienza" dal 1978 al 1993.

A parte la suddivisione in capitoli, la struttura del libro consiste nell'aver articolato ogni capitolo in paragrafi dedicati ciascuno ad uno specifico argomento. Per ogni argomento si sono brevemente illustrati quegli aspetti che gli studenti trovano più ostici completandone l'illustrazione con esempi opportunamente scelti. Ed è proprio sulla scelta degli esempi e nella loro dettagliata discussione che pensiamo d'aver mostrato come si debba affrontare la risoluzione di un problema. Ogni paragrafo contiene infine una serie di esercizi (di cui viene data a parte la soluzione) proposti in ordine di difficoltà approssimativamente crescente. È nel cercare di risolvere questi esercizi che lo studente può e deve verificare la propria preparazione.

Riteniamo utile dare alcuni consigli:

- 1) affrontare gli esercizi solo dopo aver adeguatamente studiato la teoria;
- 2) capire "qualitativamente" il fenomeno fisico presentato dal problema individuandone gli aspetti importanti e cercando poi di tradurre in termini logico-quantitativi la struttura dello stesso;
- 3) non guardare la soluzione; è bene ricordare che vale più un pomeriggio di studio dedicato ad un solo esercizio (non importa se si riesce a risolverlo o meno) piuttosto che risolvere dieci esercizi aiutandosi ogni volta col leggere la soluzione: nelle nostre intenzioni la soluzione dovrebbe servire solo come verifica finale;
- 4) ricordare che si può ritenere di aver ben capito una certa parte della teoria solo se si riesce ad affrontarne i relativi esercizi con una buona probabilità di successo.

Proprio in questo spirito abbiamo ritenuto opportuno raggruppare nell'ultima parte del libro i problemi proposti nelle sessioni d'esame degli anni '90, '91, '92 e '93 dandone le soluzioni in forma volutamente stringata.

Non siamo così presuntuosi da pensare che il libro sia esente da errori, malgrado l'impegno con cui l'abbiamo scritto. Saremo molto grati a chi, trovando qualche errore, ce ne segnalasse la presenza.

Buon lavoro

*Roma, maggio 1993*

*Gli autori*

# INDICE

PREFAZIONE . . . . .	Pag.	v
----------------------	------	---

## Capitolo 1 - Elettrostatica

1. <i>Introduzione</i> . . . . .	"	1
2. <i>Elettrostatica nel vuoto</i> . . . . .	"	1
2.1 Esempio . . . . .	"	6
2.2 Esempio . . . . .	"	9
2.3 Esempio . . . . .	"	10
2.4 Esempio . . . . .	"	11
2.5 Esempio . . . . .	"	12
2.6 Esempio . . . . .	"	13
2.7 Esempio . . . . .	"	16
2.8 Esempio . . . . .	"	17
2.9 Esempio . . . . .	"	19
2.10 Esempio . . . . .	"	21
2.11 Problemi . . . . .	"	23
2.12 Soluzioni . . . . .	"	30
3. <i>Elettrostatica dei conduttori nel vuoto</i> . . . . .	"	44
3.1 Esempio . . . . .	"	46
3.2 Esempio . . . . .	"	48
3.3 Esempio . . . . .	"	51
3.4 Esempio . . . . .	"	55
3.5 Problemi . . . . .	"	56
3.6 Soluzioni . . . . .	"	60
4. <i>Elettrostatica nei dielettrici</i> . . . . .	"	68

4.1 Esempio . . . . .	Pag.	70
4.2 Esempio . . . . .	"	72
4.3 Esempio . . . . .	"	73
4.4 Esempio . . . . .	"	74
4.5 Esempio . . . . .	"	76
4.6 Esempio . . . . .	"	76
4.7 Problemi . . . . .	"	78
4.8 Soluzioni . . . . .	"	85
 <b>Capitolo 2 - Correnti continue e quasi stazionarie</b>		
1. <i>Introduzione</i> . . . . .	"	97
2. <i>Correnti continue</i> . . . . .	"	97
2.1 Legge di Ohm . . . . .	"	97
2.2 Correnti elettriche e dissipazione di energia . . . . .	"	98
2.3 Forza elettromotrice e campo elettromotore . . . . .	"	99
2.4 Analisi dei circuiti in corrente continua . . . . .	"	101
2.5 Conduttori percorsi da corrente contenenti anche cariche statiche	"	104
2.6 Esempio . . . . .	"	104
2.7 Esempio . . . . .	"	106
2.8 Esempio . . . . .	"	109
2.9 Esempio . . . . .	"	111
2.10 Problemi . . . . .	"	113
2.11 Soluzioni . . . . .	"	119
3. <i>Correnti quasi stazionarie</i> . . . . .	"	139
3.1 <i>Introduzione</i> . . . . .	"	139
3.2 Esempio . . . . .	"	140
3.3 Esempio . . . . .	"	142
3.4 Esempio . . . . .	"	144
3.5 Problemi . . . . .	"	146
3.6 Soluzioni . . . . .	"	153
 <b>Capitolo 3 - Magnetostatica</b>		
1. <i>Introduzione</i> . . . . .	"	175
2. <i>Magnetostatica nel vuoto</i> . . . . .	"	175
2.1 Formule di Laplace e forza di Lorentz . . . . .	"	175
2.2 Teorema di equivalenza di Ampère . . . . .	"	177

2.3 Energia del campo magnetico e forze d'interazione magnetica . . .	Pag.	178
2.4 Esempio . . . . .	"	179
2.5 Esempio . . . . .	"	180
2.6 Esempio . . . . .	"	181
2.7 Esempio . . . . .	"	183
2.8 Esempio . . . . .	"	184
2.9 Esempio . . . . .	"	186
2.10 Problemi . . . . .	"	188
2.11 Soluzioni . . . . .	"	199
3. <i>Magnetostatica nella materia</i> . . . . .	"	225
3.1 Introduzione . . . . .	"	225
3.2 Materiali diamagnetici e paramagnetici . . . . .	"	225
3.3 Materiali ferromagnetici . . . . .	"	227
3.4 Esempio . . . . .	"	229
3.5 Esempio . . . . .	"	230
3.6 Problemi . . . . .	"	231
3.7 Soluzioni . . . . .	"	236
 <b>Capitolo 4- L'induzione elettromagnetica e la corrente di spostamento</b>		
1. <i>Introduzione</i> . . . . .	"	249
2. <i>Induzione di movimento</i> . . . . .	"	250
2.1 Esempio . . . . .	"	251
2.2 Esempio . . . . .	"	253
2.3 Esempio . . . . .	"	254
2.4 Esempio . . . . .	"	256
2.5 Problemi . . . . .	"	258
2.6 Soluzioni . . . . .	"	264
3. <i>Induzione dovuta a campo magnetico variabile</i> . . . . .	"	272
3.1 Esempio . . . . .	"	272
3.2 Esempio . . . . .	"	274
3.3 Problemi . . . . .	"	276
3.4 Soluzioni . . . . .	"	278
4. <i>Calcolo dei coefficienti di mutua e autoinduzione</i> . . . . .	"	284
4.1 Esempio . . . . .	"	284
4.2 Esempio . . . . .	"	286

4.3 Problemi . . . . .	Pag.	286
4.4 Soluzioni . . . . .	”	289
5. <i>Circuiti RL</i> . . . . .	”	292
5.1 Esempio . . . . .	”	293
5.2 Esempio . . . . .	”	295
5.3 Esempio . . . . .	”	296
5.4 Problemi . . . . .	”	297
5.5 Soluzioni . . . . .	”	300
6. <i>Corrente di spostamento</i> . . . . .	”	304
6.1 Esempio . . . . .	”	304
6.2 Esempio . . . . .	”	305
6.3 Problemi . . . . .	”	306
6.4 Soluzioni . . . . .	”	307

**Capitolo 5- Correnti sinusoidali e periodiche**

1. <i>Introduzione</i> . . . . .	”	309
2. <i>Circuiti in regime sinusoidale</i> . . . . .	”	309
2.1 Il metodo simbolico . . . . .	”	310
2.2 Potenza dissipata in regime sinusoidale . . . . .	”	314
2.3 Esempio . . . . .	”	315
2.4 Esempio . . . . .	”	319
2.5 Esempio . . . . .	”	320
2.6 Problemi . . . . .	”	321
2.7 Soluzioni . . . . .	”	327

**Capitolo 6- Onde Elettromagnetiche**

1. <i>Introduzione</i> . . . . .	”	349
1.1 Esempio . . . . .	”	351
1.2 Esempio . . . . .	”	352
1.3 Esempio . . . . .	”	353
1.4 Esempio . . . . .	”	355
1.5 Esempio . . . . .	”	356
1.6 Esempio . . . . .	”	357
1.7 Esempio . . . . .	”	359
1.8 Problemi . . . . .	”	360
1.9 Soluzioni . . . . .	”	365



**Capitolo 7 - Ottica geometrica e ondulatoria**

1. <i>Introduzione</i> . . . . .	Pag.	373
2. <i>Ottica geometrica</i> . . . . .	"	373
2.1 Generalità . . . . .	"	373
2.2 Convenzione sui segni . . . . .	"	374
2.3 Specchi e diottri semplici (sferici) . . . . .	"	374
2.4 Lente spessa . . . . .	"	375
2.5 Lente sottile . . . . .	"	376
2.6 Costruzione geometrica delle immagini . . . . .	"	377
2.7 Esempio . . . . .	"	379
2.8 Esempio . . . . .	"	380
2.9 Esempio . . . . .	"	381
2.10 Esempio . . . . .	"	382
2.11 Esempio . . . . .	"	382
2.12 Esempio . . . . .	"	384
2.13 Esempio . . . . .	"	385
2.14 Problemi . . . . .	"	386
2.15 Soluzioni . . . . .	"	392
3. <i>Ottica ondulatoria</i> . . . . .	"	407
3.1 Interferenza . . . . .	"	407
3.2 Interferenza alla Young . . . . .	"	408
3.3 Diffrazione . . . . .	"	409
3.4 Diffrazione alla Fraunhofer . . . . .	"	409
3.5 Interferenza e diffrazione da doppia fenditura . . . . .	"	410
3.6 Riflessione e rifrazione . . . . .	"	412
3.7 Polarizzazione della luce e angolo di Brewster . . . . .	"	412
3.8 Esempio . . . . .	"	413
3.9 Esempio . . . . .	"	414
3.10 Esempio . . . . .	"	415
3.11 Esempio . . . . .	"	417
3.12 Esempio . . . . .	"	419
3.13 Esempio . . . . .	"	421
3.14 Problemi . . . . .	"	422
3.15 Soluzioni . . . . .	"	429

**Capitolo 8 - Prove d'esame**

1. <i>Testi</i> . . . . .	Pag.	445
2. <i>Soluzioni</i> . . . . .	"	476

# 1 - ELETTROSTATICA

## 1 - Introduzione

Gli esempi e i problemi di questo capitolo sono stati scelti e suddivisi in modo da introdurre gradatamente lo studente all'uso delle grandezze fondamentali dell'elettrostatica, cioè la quantità di carica  $Q$ , l'intensità del campo elettrico  $\vec{E}$ , il potenziale elettrostatico  $V$ , l'intensità di polarizzazione  $\vec{P}$  e il vettore spostamento elettrico  $\vec{D}$ .

Il capitolo è diviso in tre parti. Nella prima i problemi riguardano cariche elettriche nel vuoto. Si tratta del caso più semplice in quanto i vettori  $\vec{P}$  e  $\vec{D}$  non compaiono. Nella seconda parte vengono affrontati problemi che si riferiscono a situazioni in cui sono presenti corpi conduttori nel vuoto. In questi casi il fenomeno dell'induzione elettrostatica può rendere notevolmente complicati i problemi. Tuttavia noi non considereremo qui *il problema fondamentale dell'elettrostatica* consistente nel determinare in tutti i punti dello spazio, essendo nota la densità di carica  $\rho$ , il potenziale elettrostatico  $V_0$ , che soddisfa all'*equazione di Poisson*

$$\operatorname{div} \vec{E}_0 = -\operatorname{div} \operatorname{grad} V_0 = -\nabla^2 V_0 = \rho$$

quando siano dati i potenziali a cui si trovano i vari conduttori oppure le cariche presenti sulle loro superfici, ma ci limiteremo a considerare solo alcune situazioni molto semplici e di notevole interesse come i condensatori.

La terza parte contiene problemi in cui si presentano dei corpi isolanti (dielettrici).

## 2 - Elettrostatica nel vuoto

Le proprietà fondamentali del campo elettrostatico nel vuoto  $\vec{E}_0$ , possono

essere espresse in forma integrale mediante le equazioni

$$(1) \quad \oint \vec{E}_0 \cdot d\vec{l} = 0 \quad (\text{il campo è conservativo})$$

$$(2) \quad \Phi_S(\vec{E}_0) \equiv \oint_S \vec{E}_0 \cdot \vec{n} dS = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (\text{Teorema di Gauss})$$

Nella (1) il simbolo  $\oint \vec{E}_0 \cdot d\vec{l}$  indica l'integrale curvilineo di  $\vec{E}_0$  esteso ad una curva chiusa e orientata, detto anche *circuizione di  $\vec{E}_0$* .

Nella (2)  $\Phi_S(\vec{E}_0)$  è il *flusso di  $\vec{E}_0$*  attraverso una qualsiasi superficie chiusa  $S$  la cui normale  $\vec{n}$  è in ogni punto orientata verso l'esterno del volume  $\tau$ , contenente la carica  $Q$ , racchiuso da  $S$ ;  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  unità S.I. è la *costante dielettrica del vuoto*.

Se si assume che il campo  $\vec{E}_0$  è differenziabile, le (1) e (2) possono essere sostituite dalle corrispondenti equazioni differenziali

$$(3) \quad \text{rot } \vec{E}_0 = 0$$

$$(4) \quad \text{div } \vec{E}_0 = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

in cui  $\rho$  è la densità di carica tale che  $Q = \int \rho d\tau$ .

### Osservazione

Le equazioni (3) e (4) costituiscono un sistema di  $3 + 1 = 4$  equazioni per le 3 componenti del campo elettrico  $\vec{E}_0$ . Tuttavia le tre equazioni che si ottengono dall'equazione vettoriale (3) non sono indipendenti in quanto si ha identicamente  $\text{div rot } \vec{E}_0 = 0$

Il problema dell'elettrostatica nel vuoto è quello di determinare il campo  $\vec{E}_0$  che soddisfa le equazioni (3) e (4), nota la densità di distribuzione delle cariche  $\rho$ . In generale questo problema risulta enormemente semplificato osservando che, in base alla (1), il campo  $\vec{E}_0$  si può ottenere come il gradiente di una funzione scalare  $V_0$ , detta il *potenziale elettrostatico*, definita dalla

$$(5) \quad V_0(P) = - \int_{P_0}^P \vec{E}_0 \cdot d\vec{l} + V_0(P_0)$$

dove l'integrale a secondo membro è un integrale curvilineo esteso a una *qualsiasi* curva orientata congiungente i due punti  $P_0$  e  $P$ . Il punto  $P_0$  viene spesso scelto all'infinito ed il potenziale corrispondente,  $V(\infty)$ , posto uguale a zero.