

JOHN DAVID JACKSON

ELETTRODINAMICA CLASSICA

*seconda edizione italiana
condotta sulla terza edizione americana*

ED. 03225640

ELETTRODINAMICA
CLASSICA 2. ED.
UD. 0193
JACKSON

ZANICHELLI
MILANO

ZANICHELLI

Indice

Prefazione	xi
Prefazione alla seconda edizione	xiii
Prefazione alla prima edizione	xv
Formule di calcolo vettoriale	xviii
Teoremi di calcolo vettoriale	xviii
Forme esplicite di operazioni vettoriali	xix
Dove trovare informazioni essenziali sulle funzioni speciali	xx
Introduzione e quadro generale	1
I.1. Le equazioni di Maxwell nel vuoto, i campi e le sorgenti	2
I.2. La legge dell'inverso del quadrato della distanza o la massa del fotone	5
I.3. Il principio di sovrapposizione lineare	9
I.4. Le equazioni di Maxwell nei mezzi macroscopici	12
I.5. Le condizioni al contorno sulle superfici di separazione fra mezzi diversi	15
I.6. Alcune osservazioni sulle idealizzazioni in elettromagnetismo	18
<i>Referenze e letture consigliate</i>	20
1 Introduzione all'elettrostatica	22
1.1. La legge di Coulomb	22
1.2. Il campo elettrico	23
1.3. La legge di Gauss	25
1.4. La forma differenziale della legge di Gauss	26
1.5. Un'altra equazione dell'elettrostatica e il potenziale scalare	27
1.6. Distribuzioni superficiali di cariche e dipoli e discontinuità nel potenziale e nel campo elettrico	29
1.7. Le equazioni di Poisson e di Laplace	32
1.8. Il teorema di Green	33
1.9. L'unicità della soluzione con condizioni al contorno di Dirichlet o di Neumann	35
1.10. La soluzione formale del problema elettrostatico dei valori al contorno con la funzione di Green	36
1.11. L'energia potenziale e la densità di energia elettrostatiche; la capacità	38
1.12. Approccio variazionale alla soluzione delle equazioni di Laplace e di Poisson	41
1.13. Il metodo del rilassamento per problemi elettrostatici bidimensionali	45

<i>Referenze e letture consigliate</i>	47
<i>Problemi</i>	48
2 Problemi di valori al contorno in elettrostatica (I)	55
2.1. Il metodo delle immagini	55
2.2. Carica puntiforme in presenza di una sfera conduttrice messa a terra	56
2.3. Carica puntiforme in presenza di una sfera conduttrice carica ed isolata	59
2.4. Carica puntiforme vicino ad una sfera conduttrice a potenziale fissato	60
2.5. Sfera conduttrice in un campo elettrico uniforme con il metodo delle immagini	61
2.6. La funzione di Green per la sfera; la soluzione generale per il potenziale	62
2.7. Sfera conduttrice con emisferi a potenziali differenti	63
2.8. Funzioni ortogonali e sviluppi	65
2.9. La separazione delle variabili; l'equazione di Laplace in coordinate cartesiane	68
2.10. Un problema bidimensionale di potenziale; somma di una serie di Fourier	70
2.11. I campi e le densità di carica entro angoli bidimensionali e lungo spigoli	73
2.12. Introduzione all'analisi agli elementi finiti per l'elettrostatica	77
<i>Referenze e letture consigliate</i>	82
<i>Problemi</i>	83
3 Problemi di valori al contorno in elettrostatica (II)	93
3.1. L'equazione di Laplace in coordinate sferiche	93
3.2. L'equazione di Legendre e i polinomi di Legendre	94
3.3. Problemi di valori al contorno con simmetria azimutale	98
3.4. Il comportamento dei campi in una cavità conica o vicino ad una punta aguzza	101
3.5. Le funzioni associate di Legendre e le armoniche sferiche $Y_{lm}(\theta, \phi)$	105
3.6. Il teorema di somma per le armoniche sferiche	107
3.7. L'equazione di Laplace in coordinate cilindriche; le funzioni di Bessel	109
3.8. Problemi di valori al contorno in coordinate cilindriche	114
3.9. Sviluppo delle funzioni di Green in coordinate sferiche	116
3.10. Soluzione di problemi di potenziale tramite lo sviluppo in funzioni di Green sferiche	119
3.11. Sviluppo delle funzioni di Green in coordinate cilindriche	122
3.12. Sviluppi in autofunzioni per le funzioni di Green	124
3.13. Condizioni al contorno miste; un piano conduttore con un foro circolare	126
<i>Referenze e letture consigliate</i>	131
<i>Problemi</i>	132
4 Multipoli, elettrostatica dei mezzi macroscopici, dielettrici	142
4.1. Lo sviluppo in multipoli	142
4.2. Lo sviluppo in multipoli dell'energia di una distribuzione di carica in un campo esterno	147
4.3. Una trattazione elementare dell'elettrostatica nei mezzi materiali	148
4.4. Problemi di valori al contorno con dielettrici	151
4.5. La polarizzabilità molecolare e la suscettività elettrica	156
4.6. Modelli per la polarizzabilità molecolare	159
4.7. L'energia elettrostatica nei dielettrici	161
<i>Referenze e letture consigliate</i>	163
<i>Problemi</i>	166

5 Magnetostatica, legge di Faraday, campi quasi-statici	170
5.1. Introduzione e definizioni	170
5.2. La legge di Biot e Savart	171
5.3. Le equazioni differenziali della magnetostatica e la legge di Ampère	174
5.4. Il potenziale vettore	176
5.5. Il potenziale vettore e l'induzione magnetica per un anello circolare di corrente	177
5.6. Campi magnetici di una distribuzione localizzata di corrente; il momento magnetico	180
5.7. Forza e coppia agenti su una distribuzione localizzata di corrente e sua energia in un campo esterno di induzione magnetica	184
5.8. Le equazioni macroscopiche; condizioni al contorno per $\mathbf{B}$ e $\mathbf{H}$	187
5.9. Metodi di soluzione dei problemi di valori al contorno in magnetostatica	190
5.10. Sfera magnetizzata uniformemente	193
5.11. Sfera magnetizzata in un campo esterno; magneti permanenti	195
5.12. Schermaggio magnetico; guscio sferico di materiale permeabile in un campo uniforme	197
5.13. Effetti di un foro circolare entro un piano perfettamente conduttore con un campo magnetico tangente asintoticamente uniforme da uno dei lati	199
5.14. Metodi numerici per campi magnetici bidimensionali	202
5.15. La legge di Faraday sull'induzione	204
5.16. L'energia del campo magnetico	207
5.17. Energia, mutue ed auto-induttanze	210
5.18. Campi magnetici quasi-statici nei conduttori; le correnti parassite; la diffusione magnetica	213
<i>Referenze e letture consigliate</i>	219
<i>Problemi</i>	220
6 Equazioni di Maxwell, elettromagnetismo macroscopico, leggi di conservazione	231
6.1. La corrente di spostamento di Maxwell; le equazioni di Maxwell	231
6.2. Il potenziale vettore e il potenziale scalare	233
6.3. Le trasformazioni di gauge; la gauge di Lorenz, la gauge di Coulomb	234
6.4. Funzioni di Green per l'equazione d'onda	236
6.5. Le soluzioni ritardate per i campi; la generalizzazione di Jefimenko delle leggi di Coulomb e di Biot-Savart; le espressioni di Heaviside-Feynman per i campi di una carica puntiforme	239
6.6. Derivazione delle equazioni dell'elettromagnetismo macroscopico	241
6.7. Il teorema di Poynting e la conservazione dell'energia e dell'impulso per un sistema di particelle cariche e di campi elettromagnetici	251
6.8. Il teorema di Poynting in mezzi lineari dispersivi con perdite	255
6.9. Il teorema di Poynting per i campi armonici; definizioni di impedenza ed ammettenza in termini di campo	257
6.10. Le proprietà di trasformazione dei campi elettromagnetici e delle loro sorgenti rispetto a rotazioni, riflessioni spaziali ed inversione del tempo	260
6.11. Il problema dei monopoli magnetici	265
6.12. Discussione sulle condizioni di quantizzazione di Dirac	268
6.13. I potenziali di polarizzazione (vettori di Hertz)	273
<i>Referenze e letture consigliate</i>	274
<i>Problemi</i>	275

7	Onde elettromagnetiche piane e propagazione per onde	286
7.1.	Onde piane in un mezzo non conduttore	286
7.2.	Polarizzazione lineare e circolare, i parametri di Stokes	290
7.3.	La riflessione e la rifrazione di onde elettromagnetiche su una superficie piana di separazione fra due dielettrici	294
7.4.	La polarizzazione per riflessione e la riflessione totale interna; l'effetto Goos-Hänchen	298
7.5.	Caratteristiche dispersive di dielettrici, conduttori e plasmi in funzione della frequenza	300
7.6.	Un modello semplificato della propagazione nella ionosfera e nella magnetosfera	307
7.7.	Onde magnetoidrodinamiche	310
7.8.	Sovrapposizione di onde in una dimensione; la velocità di gruppo	313
7.9.	Un esempio di allargamento di un impulso mentre si propaga in un mezzo dispersivo	317
7.10.	Relazione fra $\mathbf{D}$ ed $\mathbf{E}$ e principio di causalità; le formule di Kramers-Kronig	320
7.11.	L'arrivo di un segnale dopo una propagazione attraverso un mezzo dispersivo	325
	<i>Referenze e letture consigliate</i>	329
	<i>Problemi</i>	330
8	Guide d'onda, cavità risonanti e fibre ottiche	341
8.1.	I campi sulla superficie ed all'interno di un conduttore	341
8.2.	Cavità cilindriche e guide d'onda	345
8.3.	Le guide d'onda	348
8.4.	Modi in una guida d'onda rettangolare	350
8.5.	Il flusso di energia e l'attenuazione nelle guide d'onda	351
8.6.	Perturbazione delle condizioni al contorno	355
8.7.	Le cavità risonanti	357
8.8.	Perdite di potenza in una cavità; il Q di una cavità	359
8.9.	Il sistema Terra-ionosfera come cavità risonante: le risonanze di Schumann	363
8.10.	La propagazione multimodo nelle fibre ottiche	366
8.11.	Modi nelle guide d'onda dielettriche	372
8.12.	Sviluppo in modi normali; i campi generati da una sorgente localizzata in una guida metallica cava	377
	<i>Referenze e letture consigliate</i>	382
	<i>Problemi</i>	384
9	Sistemi radianti, campi multipolari e radiazione	394
9.1.	I campi e la radiazione di una sorgente oscillante localizzata	394
9.2.	I campi e la radiazione di dipolo elettrico	397
9.3.	I campi di dipolo magnetico e di quadrupolo elettrico	400
9.4.	Un'antenna rettilinea alimentata al centro	403
9.5.	Sviluppo in multipoli per una sorgente localizzata o per un'apertura in una guida d'onda	406
9.6.	Le onde sferiche soluzioni dell'equazione d'onda scalare	412
9.7.	Sviluppo in multipoli dei campi elettromagnetici	416
9.8.	Proprietà dei campi multipolari, l'energia e il momento angolare della radiazione di multipolo	419
9.9.	La distribuzione angolare della radiazione di multipolo	423

9.10. Sorgenti di radiazione di multipolo; i momenti di multipolo	426
9.11. Radiazione di multipolo in sistemi atomici e nucleari	429
9.12. La radiazione multipolare emessa da un'antenna rettilinea alimentata al centro	431
<i>Referenze e letture consigliate</i>	435
<i>Problemi</i>	436
10 Diffusione e diffrazione	443
10.1. La diffusione a grandi lunghezze d'onda	443
10.2. Teoria perturbativa della diffusione; la teoria di Rayleigh dell'azzurro del cielo; la diffusione da parte di gas e di liquidi; l'attenuazione nelle fibre ottiche	450
10.3. Lo sviluppo in onde sferiche di un'onda piana vettoriale	458
10.4. Diffusione di onde elettromagnetiche su una sfera	460
10.5. Teoria scalare della diffrazione	465
10.6. Gli equivalenti vettoriali dell'integrale di Kirchhoff	469
10.7. La teoria vettoriale della diffrazione	472
10.8. Il principio di Babinet degli schermi complementari	474
10.9. La diffrazione attraverso una apertura circolare; osservazioni sulle piccole aperture	477
10.10. La diffusione nel limite di piccole lunghezze d'onda	482
10.11. Il teorema ottico e questioni connesse	486
<i>Referenze e letture consigliate</i>	492
<i>Problemi</i>	494
11 Teoria della relatività ristretta	501
11.1. La situazione prima del 1900 e i due postulati di Einstein	502
11.2. Alcuni esperimenti recenti	505
11.3. Le trasformazioni di Lorentz e i risultati cinematici fondamentali della relatività ristretta	511
11.4. La composizione delle velocità, la 4-velocità	517
11.5. La quantità di moto e l'energia relativistiche di una particella	519
11.6. Proprietà matematiche dello spazio-tempo della relatività ristretta	526
11.7. La rappresentazione matriciale delle trasformazioni di Lorentz, i genera- tori infinitesimali	529
11.8. La precessione di Thomas	534
11.9. L'invarianza della carica elettrica e la covarianza dell'elettrodinamica	539
11.10. Le trasformazioni dei campi elettromagnetici	543
11.11. L'equazione relativistica del moto di uno spin in campi esterni uniformi o lentamente variabili	547
11.12. Osservazioni sulle notazioni e sulle unità impiegate nella cinematica re- lativistica	551
<i>Referenze e letture consigliate</i>	552
<i>Problemi</i>	553
12 Dinamica delle particelle relativistiche e dei campi elettromagnetici	565
12.1. La Lagrangiana e la Hamiltoniana di una particella carica relativistica entro campi elettromagnetici esterni	566
12.2. Moto in un campo magnetico uniforme e statico	571
12.3. Moto in campi elettrici e magnetici sovrapposti, statici e uniformi	572
12.4. La deriva di particelle in campi magnetici statici non uniformi	574
12.5. L'invarianza adiabatica del flusso lungo l'orbita di una particella	578

12.6. Le correzioni relativistiche all'ordine più basso della Lagrangiana di particelle cariche interagenti; la Lagrangiana di Darwin	582
12.7. La Lagrangiana del campo elettromagnetico	584
12.8. La Lagrangiana di Proca, effetti della massa del fotone	586
12.9. La massa effettiva del "fotone" in superconduttività; la profondità di penetrazione di London	589
12.10. I tensori degli sforzi canonico e simmetrico; leggi di conservazione	591
12.11. Soluzione dell'equazione d'onda in forma covariante; funzioni di Green invarianti	598
<i>Referenze e letture consigliate</i>	601
<i>Problemi</i>	603
 13 Urti fra particelle cariche, perdite di energia e diffusione; radiazione Cerenkov e di transizione	610
13.1. Trasferimento di energia in un urto coulombiano fra una particella pesante incidente su elettroni liberi in quiete; la perdita di energia nelle collisioni strette	611
13.2. Perdite di energia per urti soffici; perdita totale di energia	613
13.3. L'effetto di densità nelle perdite di energia per urto	617
13.4. La radiazione di Cerenkov	623
13.5. La diffusione elastica di particelle cariche relativistiche da parte di atomi	626
13.6. L'angolo quadratico medio di diffusione e la distribuzione angolare nella diffusione multipla	628
13.7. La radiazione di transizione	632
<i>Referenze e letture consigliate</i>	639
<i>Problemi</i>	640
 14 Irraggiamento di cariche in moto	646
14.1. I potenziali ed i campi di Liénard-Wiechert per una carica puntiforme	646
14.2. Potenza totale irradiata da una carica accelerata; la formula di Larmor e la sua generalizzazione relativistica	650
14.3. La distribuzione angolare della radiazione emessa da una carica in moto accelerato	653
14.4. La radiazione emessa da una carica in moto arbitrario ultrarelativistico	656
14.5. La distribuzione in frequenza e la distribuzione angolare dell'energia irradiata da cariche in moto accelerato	658
14.6. Lo spettro di frequenza della radiazione emessa da una particella carica relativistica in moto circolare istantaneo	661
14.7. Gli ondulatori ed i wiggler per sorgenti di luce di sincrotrone	668
14.8. La diffusione Thomson dei fotoni	678
<i>Referenze e letture consigliate</i>	682
<i>Problemi</i>	682
 15 Radiazione di frenamento, metodo dei quanti virtuali, processi beta radiativi	692
15.1. Radiazione emessa durante le collisioni	693
15.2. La radiazione di frenamento nelle collisioni coulombiane	698
15.3. Gli effetti di schermaggio; perdite di energia relativistiche per irraggiamento	704
15.4. Il metodo dei quanti virtuali di Weizsäcker-Williams	708
15.5. La radiazione di frenamento come diffusione di quanti virtuali	713
15.6. La radiazione emessa durante il decadimento beta	714

15.7. La radiazione emessa durante la cattura di un elettrone orbitale; distruzione di carica e momento magnetico	716
<i>Referenze e letture consigliate</i>	720
<i>Problemi</i>	721
16 Smorzamento radiativo, modelli classici di particelle cariche	728
16.1. Considerazioni introduttive	728
16.2. La forza di reazione radiativa dalla conservazione dell'energia	730
16.3. La stima della auto-forza secondo Abraham-Lorentz	733
16.4. Covarianza relativistica; il tensore degli sforzi di Poincaré e la stabilità	738
16.5. Definizione covariante dell'energia e dell'impulso elettromagnetici	739
16.6. Particella carica stabile e covariante	741
16.7. Larghezza di riga e spostamento dei livelli di un oscillatore radiante	746
16.8. La diffusione e l'assorbimento di radiazione da parte di un oscillatore	748
<i>Referenze e letture consigliate</i>	750
<i>Problemi</i>	751
Appendice sulle unità di misura e sulle dimensioni	756
1. Unità di misura e dimensioni, le unità fondamentali e le unità derivate	756
2. Unità di misura ed equazioni elettromagnetiche	758
3. I vari sistemi di unità di misura elettromagnetiche	760
4. Conversione delle equazioni e delle quantità fra unità gaussiane e unità SI	763
Bibliografia	766
Indice analitico	772