

La fisica di *Feynman*

Principalmente Elettromagnetismo e Struttura della Materia

Volume II - Parte I

Traduzione a cura di

S. FRANCHETTI

*Ordinario di Fisica generale
Università di Torino*

Coordinatore,

G. GORALDO DI FRANCA

*Ordinario di Fisica superiore
Università di Firenze*

The *Feynman* LECTURES ON PHYSICS

Mainly Electromagnetism and Matter

Volume II - Part I

RICHARD P. FEYNMAN

*Richard Chace Tolson Professor of Theoretical Physics
California Institute of Technology*

ROBERT B. LEIGHTON

*Professor of Physics
California Institute of Technology*

MATTHEW SANDS

*Professor
Stanford University*

MASSON 
Milano • Parigi • Barcellona
1994

Indice

Capitolo 1 L'elettromagnetismo

1.1	Le forze elettriche	1-1
1.2	I campi elettrici e magnetici	1-5
1.3	Caratteristiche dei campi vettoriali	1-6
1.4	Le leggi dell'elettromagnetismo	1-8
1.5	Cosa sono i campi?	1-14
1.6	L'elettromagnetismo nella scienza e nella tecnica	1-15

Capitolo 2 Calcolo differenziale dei campi vettoriali

2-1	La comprensione della fisica	2-1
2-2	Campi scalari e vettoriali— T e $\mathbf{h}$	2-2
2-3	Derivate dei campi. Il gradiente	2-6
2-4	L'operatore ∇	2-10
2-5	Operazioni con ∇	2-11
2-6	L'equazione differenziale del flusso di calore	2-13
2-7	Derivate seconde dei campi vettoriali	2-14
2-8	Trabocchetti	2-17

Capitolo 3 Calcolo integrale dei vettori

3-1	Integrali dei vettori. L'integrale di linea di $\nabla \Psi$	3-1
3-2	Il flusso di un campo vettoriale	3-4
3-3	Il flusso uscente da un cubetto. Il teorema di Gauss	3-6
3-4	Conduzione del calore. L'equazione di diffusione	3-8
3-5	La circolazione di un campo vettoriale	3-11
3-6	La circolazione intorno a un quadrato. Il teorema di Stokes	3-13
3-7	Campi con rotore nullo e a divergenza nulla	3-16
3-8	Riassunto	3-18

Contents

Chapter 1 Electromagnetism

1-1	Electrical forces	1-1
1-2	Electric and magnetic fields	1-5
1-3	Characteristics of vector fields	1-6
1-4	The laws of electromagnetism	1-8
1-5	What are the fields?	1-14
1-6	Electromagnetism: in science and technology	1-15

Chapter 2 Differential Calculus of Vector Fields

2-1	Understanding physics	2-1
2-2	Scalar and vector fields— T and $\mathbf{h}$	2-2
2-3	Derivatives of fields—the gradient	2-6
2-4	The operator ∇	2-10
2-5	Operations with ∇	2-11
2-6	The differential equation of heat flow	2-13
2-7	Second derivatives of vector fields	2-14
2-8	Pitfalls	2-17

Chapter 3 Vector Integral Calculus

3-1	Vector integrals; the line integral of $\nabla \Psi$	3-1
3-2	The flux of a vector field	3-4
3-3	The flux from a cube; Gauss' theorem	3-6
3-4	Heat conduction; the diffusion equation	3-8
3-5	The circulation of a vector field	3-11
3-6	The circulation around a square; Stokes' theorem	3-13
3-7	Curl-free and divergence-free fields	3-16
3-8	Summary	3-18

Capitolo 4 Elettrostatica

4-1	Statica	4-1
4-2	La legge di Coulomb. Sovrapposizione	4-3
4-3	Il potenziale elettrico	4-6
4-4	$E = -\nabla \phi$	4-9
4-5	Il flusso di E	4-10
4-6	La legge di Gauss e la divergenza di E	4-14
4-7	Campo di una sfera di carica	4-16
4-8	Linee di campo e superfici equipotenziali	4-17

Capitolo 5 Applicazioni della legge di Gauss

5-1	L'elettrostatica è la legge di Gauss, più	5-1
5-2	Equilibrio in un campo elettrostatico	5-1
5-3	Equilibrio in presenza di conduttori	5-3
5-4	Stabilità degli atomi	5-4
5-5	Il campo di una carica lineare	5-5
5-6	Una lamina carica; due lamine	5-6
5-7	Una sfera di carica; un guscio sferico	5-8
5-8	Il campo di una carica puntiforme varia esattamente come $1/r^2$	5-9
5-9	I campi di un conduttore	5-13
5-10	Il campo in una cavità di un conduttore	5-14

Capitolo 6 Il campo elettrico in circostanze varie

6-1	Equazioni per il potenziale elettrostatico	6-1
6-2	Il dipolo elettrico	6-2
6-3	Osservazioni sulle equazioni vettoriali	6-6
6-4	Il potenziale del dipolo come un gradiente	6-7
6-5	L'approssimazione dipolare per una distribuzione arbitraria	6-10
6-6	I campi dovuti a conduttori carichi	6-12
6-7	Il metodo delle immagini	6-13
6-8	Una carica puntiforme vicino a un piano conduttore	6-14
6-9	Una carica puntiforme vicino a una sfera conduttrice	6-16
6-10	Condensatori; lastre parallele	6-17
6-11	Scariche a potenziali elevati	6-20
6-12	Il microscopio a emissione di campo	6-22

Chapter 4 Electrostatics

4-1	Statics	4-1
4-2	Coulomb's law; superposition	4-3
4-3	Electric potential	4-6
4-4	$E = -\nabla \phi$	4-9
4-5	The flux of E	4-10
4-6	Gauss' law; divergence of E	4-14
4-7	Field of a sphere of charge	4-16
4-8	Field lines; equipotential surfaces	4-17

Chapter 5 Application of Gauss' Law

5-1	Electrostatics is Gauss's law plus	5-1
5-2	Equilibrium in an electrostatic field	5-1
5-3	Equilibrium with conductors	5-3
5-4	Stability of atoms	5-4
5-5	The field of a line charge	5-5
5-6	A sheet of charge; two sheets	5-6
5-7	A sphere of charge; a spherical shell	5-8
5-8	Is the field of a point charge exactly $1/r^2$?	5-9
5-9	The fields of a conductor	5-13
5-10	The field in a cavity of a conductor	5-14

Chapter 6 The Electric Field in Various Circumstances

6-1	Equations of the electrostatic potential	6-1
6-2	The electric dipole	6-2
6-3	Remarks on vector equations	6-6
6-4	The dipole potential as a gradient	6-7
6-5	The dipole approximation for an arbitrary distribution	6-10
6-6	The fields of charged conductors	6-12
6-7	The method of images	6-13
6-8	A point charge near a conducting plane	6-14
6-9	A point charge near a conducting sphere	6-16
6-10	Condensers; parallel plates	6-17
6-11	High-voltage breakdown	6-20
6-12	The field-emission microscope	6-22

Capitolo 7	Il campo elettrico in circostanze varie (continuazione)	
7-1	Metodi per trovare il campo elettrostatico	7-1
7-2	Campi bidimensionali; funzioni di variabile complessa	7-3
7-3	Oscillazioni nei plasmi	7-8
7-4	Particelle colloidali in un elettrolita	7-11
7-5	Il campo elettrostatico di una griglia	7-14

Capitolo 8 L'energia elettrostatica

8-1	L'energia elettrostatica delle cariche. Sfera uniformemente carica	8-1
8-2	L'energia di un condensatore. Forze su conduttori carichi	8-3
8-3	L'energia elettrostatica di un cristallo ionico	8-7
8-4	L'energia elettrostatica nei nuclei	8-10
8-5	L'energia nel campo elettrostatico	8-15
8-6	L'energia di una carica puntiforme	8-18

Capitolo 9 L'elettricità nell'atmosfera

9-1	Il gradiente del potenziale elettrico dell'atmosfera	9-1
9-2	Correnti elettriche nell'atmosfera	9-3
9-3	Origine delle correnti elettriche nell'atmosfera	9-6
9-4	I temporali	9-7
9-5	Il meccanismo della separazione delle cariche	9-12
9-6	Il fulmine	9-16

Capitolo 10 I dielettrici

10-1	La costante dielettrica	10-1
10-2	Il vettore di polarizzazione $\mathbf{P}$	10-3
10-3	Le cariche di polarizzazione	10-5
10-4	Le equazioni dell'elettrostatica quando ci sono dielettrici	10-8
10-5	Campi e forze in presenza di dielettrici	10-10

Capitolo 11 Cosa avviene nei dielettrici

11-1	I dipoli molecolari	11-1
11-2	La polarizzazione elettronica	11-2
11-3	Molecole polari; polarizzazione da orientazione	11-5
11-4	I campi elettrici nella cavità di un dielettrico	11-8

Chapter 7 The Electric Field in Various Circumstances (continued)

7-1	Methods for finding the electrostatic field	7-1
7-2	Two-dimensional fields; functions of the complex variable	7-3
7-3	Plasma oscillations	7-8
7-4	Colloidal particles in an electrolyte	7-11
7-5	The electrostatic field of a grid	7-14

Chapter 8 Electrostatic Energy

8-1	The electrostatic energy of charges. A uniform sphere	8-1
8-2	The energy of a condenser. Forces on charged conductors	8-3
8-3	The electrostatic energy of an ionic crystal	8-7
8-4	Electrostatic energy in nuclei	8-10
8-5	Energy in the electrostatic field	8-15
8-6	The energy of a point charge	8-18

Chapter 9 Electricity in the Atmosphere

9-1	The electric potential gradient of the atmosphere	9-1
9-2	Electric currents in the atmosphere	9-3
9-3	Origin of the atmospheric currents	9-6
9-4	Thunderstorms	9-7
9-5	The mechanism of charge separation	9-12
9-6	Lightning	9-16

Chapter 10 Dielectrics

10-1	The dielectric constant	10-1
10-2	The polarization vector $\mathbf{P}$	10-3
10-3	Polarization charges	10-5
10-4	The electrostatic equations with dielectrics	10-8
10-5	Fields and forces with dielectrics	10-10

Chapter 11 Inside Dielectrics

11-1	Molecular dipoles	11-1
11-2	Electronic polarization	11-2
11-3	Polar molecules; orientation polarization	11-5
11-4	Electric fields in cavities of a dielectric	11-8

11-5	La costante dielettrica dei liquidi; l'equazione di Clausius-Mossotti	11-11
11-6	I dielettrici solidi	11-13
11-7	Ferroelectricità BaTiO_3	11-14

11-5	The dielectric constant of liquids; the Clausius-Mossotti equation	11-11
11-6	Solid dielectrics	11-13
11-7	Ferroelectricity; BaTiO_3	11-14

Capitolo 12 Analogie con l'elettrostatica

12-1	Le stesse equazioni hanno le stesse soluzioni	12-1
12-2	Il flusso di calore; una sorgente puntiforme vicina a un piano di separazione infinito	12-2
12-3	La membrana tesa	12-7
12-4	La diffusione dei neutroni; sorgente sferica uniforme in un mezzo omogeneo	12-10
12-5	Flusso irrotazionale dei liquidi; il flusso intorno a una sfera	12-13
12-6	Illuminazione; l'illuminazione uniforme di un piano	12-16
12-7	La "fondamentale unità" della natura	12-18

Chapter 12 Electrostatic Analogs

12-1	The same equations have the same solutions	12-1
12-2	The flow of heat; a point source near an infinite plane-boundary	12-2
12-3	The stretched membrane	12-7
12-4	The diffusion of neutrons; a uniform spherical source in a homogeneous medium	12-10
12-5	Irrotational fluid flow; the flow past a sphere	12-13
12-6	Illumination; the uniform lighting of a plane	12-16
12-7	The "underlying unity" of nature	12-18

Capitolo 13 Magnetostatica

13-1	Il campo magnetico	13-1
13-2	La corrente elettrica; conservazione della carica	13-2
13-3	La forza magnetica su una corrente	13-4
13-4	Il campo magnetico delle correnti stazionarie; legge di Ampère	13-5
13-5	Il campo magnetico di un filo rettilineo e di un solenoide; correnti atomiche	13-8
13-6	La relatività dei campi magnetici ed elettrici	13-11
13-7	La trasformazione delle correnti e delle cariche	13-17
13-8	Sovrapposizione, La regola della mano destra	13-18

Chapter 13 Magnetostatics

13-1	The magnetic field	13-1
13-2	Electric current; the conservation of charge	13-2
13-3	The magnetic force on a current	13-4
13-4	The magnetic field of steady currents; Ampère's law	13-5
13-5	The magnetic field of a straight wire and of a solenoid; atomic currents	13-8
13-6	The relativity of magnetic and electric fields	13-11
13-7	The transformation of currents and charges	13-17
13-8	Superposition; the right-hand rule	13-18

Capitolo 14 Il campo magnetico in circostanze varie

14-1	Il potenziale vettore	14-1
14-2	Il potenziale vettore dovuto a correnti note	14-5
14-3	Il filo rettilineo	14-7
14-4	Il solenoide lungo	14-8
14-5	Il campo di una piccola spira; il dipolo magnetico	14-11
14-6	Il potenziale vettore di un circuito	14-13
14-7	La legge di Biot e Savart	14-14

Chapter 14 The Magnetic Field in Various Situations

14-1	The vector potential	14-1
14-2	The vector potential of known currents	14-5
14-3	A straight wire	14-7
14-4	A long solenoid	14-8
14-5	The field of a small loop; the magnetic dipole	14-11
14-6	The vector potential of a circuit	14-13
14-7	The law of Biot and Savart	14-14

Capitolo 15	Il potenziale vettore	
15-1	Le forze su una spira di corrente; energia di un dipolo	15-1
15-2	Energia meccanica ed elettrica	15-5
15-3	L'energia delle correnti costanti	15-8
15-4	Confronto di B ed A	15-9
15-5	Il potenziale vettore e la meccanica quantistica	15-11
15-6	Ciò che è vero in statica è sbagliato in dinamica	15-19

Capitolo 16	Correnti indotte	
16-1	Motori e generatori	16-1
16-2	Trasformatori e induttanze	16-6
16-3	Le forze sulle correnti indotte	16-8
16-4	L'elettrotecnica	16-14

Capitolo 17	Le leggi dell'induzione	
17-1	La fisica dell'induzione	17-1
17-2	Eccezioni alla "regola del flusso"	17-3
17-3	Accelerazione di particelle per mezzo di un campo elettrico indotto; il betatrone	17-5
17-4	Un paradosso	17-8
17-5	Il generatore di corrente alternata	17-9
17-6	L'induttanza mutua	17-13
17-7	Autoinduzione	17-16
17-8	Induttanza ed energia magnetica	17-18

Capitolo 18	Le equazioni di Maxwell	
18-1	Le equazioni di Maxwell	18-1
18-2	Come funziona il nuovo termine	18-4
18-3	Tutto sulla fisica classica	18-7
18-4	Un campo che si propaga	18-7
18-5	La velocità della luce	18-12
18-6	Risoluzione delle equazioni di Maxwell; i potenziali e l'equazione delle onde	18-14

Capitolo 19	Il principio della minima azione	
	Una lezione speciale, quasi parola per parola	19-1
	Nota aggiunta dopo la lezione	19-21

Chapter 15	The Vector Potential	
15-1	The forces on a current loop; energy of a dipole	15-1
15-2	Mechanical and electrical energies	15-5
15-3	The energy of steady currents	15-8
15-4	B versus A	15-9
15-5	The vector potential and quantum mechanics	15-11
15-6	What is true for statics is false for dynamics	15-19

Chapter 16	Induced Currents	
16-1	Motors and generators	16-1
16-2	Transformers and inductances	16-6
16-3	Forces on induced currents	16-8
16-4	Electrical technology	16-14

Chapter 17	The Laws of Induction	
17-1	The physics of induction	17-1
17-2	Exceptions to the "flux rule"	17-3
17-3	Particle acceleration by an induced electric field; the betatron	17-5
17-4	A paradox	17-8
17-5	Alternating-current generator	17-9
17-6	Mutual inductance	17-13
17-7	Self-inductance	17-16
17-8	Inductance and magnetic energy	17-18

Chapter 18	The Maxwell Equations	
18-1	Maxwell's equations	18-1
18-2	How the new term works	18-4
18-3	All of classical physics	18-7
18-4	A travelling field	18-7
18-5	The speed of light	18-12
18-6	Solving Maxwell's equations; the potentials and the wave equation	18-14

Chapter 19	The Principle of Least Action	
	A special lecture—almost verbatim	19-1
	A note added after the lecture	19-21