

La fisica di *Feynman*

MECCANICA QUANTISTICA

Volume III

Traduzione a cura di **G. ALTARELLI e C. CHIODERI**

*Professore di Fisica Teorica
Università di Firenze*

Coordinatore:

GIORGIO DE FRANCIA

*Ordinario di Fisica Superiore
Università di Firenze*

The *Feynman* LECTURES ON PHYSICS

QUANTUM MECHANICS

Volume III

RICHARD P. FEYNMAN

*Richard Chace Tolman 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 • Bonn

1991

Indice

Capitolo 1 Comportamento quantistico

1-1 Meccanica atomica	1-1
1-2 Un esperimento con pallottole	1-2
1-3 Un esperimento con onde	1-4
1-4 Un esperimento con elettroni	1-5
1-5 Interferenza delle onde elettroniche	1-7
1-6 Osserviamo gli elettroni	1-8
1-7 Principi base della meccanica quantistica	1-13
1-8 Il principio di indeterminazione	1-14

Capitolo 2 Relazione tra il punto di vista ondulatorio e quello corpuscolare

2-1 Ampiezza d'onda di probabilità	2-1
2-2 Misure di posizione e di impulso	2-2
2-3 Diffrazione dai cristalli	2-6
2-4 Le dimensioni di un atomo	2-9
2-5 I livelli d'energia	2-11
2-6 Conseguenze di natura filosofica	2-12

Capitolo 3 Ampiezze di probabilità

3-1 Leggi di combinazione delle ampiezze	3-1
3-2 Interferenza da due fenditure	3-6
3-3 Diffusione da un cristallo	3-9
3-4 Particelle identiche	3-13

Capitolo 4 Particelle identiche

4-1 Particelle di Bose e particelle di Fermi	4-1
4-2 Stati di due particelle di Bose	4-4
4-3 Stati con n particelle di Bose	4-8
4-4 Emissione ed assorbimento di fotoni	4-10
4-5 Lo spettro del corpo nero	4-12
4-6 L'elio liquido	4-18
4-7 Il principio di esclusione	4-19

Contents

Chapter 1 Quantum Behavior

1-1 Atomic mechanics	1-1
1-2 An experiment with bullets	1-2
1-3 An experiment with waves	1-4
1-4 An experiment with electrons	1-5
1-5 The interference of electron waves	1-7
1-6 Watching the electrons	1-8
1-7 First principles of quantum mechanics	1-13
1-8 The uncertainty principle	1-14

Chapter 2 The Relation of Wave and Particle Viewpoints

2-1 Probability wave amplitudes	2-1
2-2 Measurement of position and momentum	2-2
2-3 Crystal diffraction	2-6
2-4 The size of an atom	2-9
2-5 Energy levels	2-11
2-6 Philosophical implications	2-12

Chapter 3 Probability Amplitudes

3-1 The laws of combining amplitudes	3-1
3-2 The two-slit interference pattern	3-6
3-3 Scattering from a crystal	3-9
3-4 Identical particles	3-13

Chapter 4 Identical Particles

4-1 Bose particles and Fermi particles	4-1
4-2 States with two Bose particles	4-4
4-3 States with n Bose particles	4-8
4-4 Emission and absorption of photons	4-10
4-5 The blackbody spectrum	4-12
4-6 Liquid helium	4-18
4-7 The exclusion principle	4-19

Capitolo 5 Spin uno		Chapter 5 Spin One	
5-1 Filtraggio degli atomi con una apparecchiatura alla Stern-Gerlach	5-1	5-1 Filtering atoms with a Stern-Gerlach apparatus	5-1
5-2 Esperimenti con atomi filtrati	5-7	5-2 Experiments with filtered atoms	5-7
5-3 Filtri di Stern-Gerlach in serie	5-9	5-3 Stern-Gerlach filters in series	5-9
5-4 Stati di base	5-11	5-4 Base states	5-11
5-5 Interferenza delle ampiezze	5-14	5-5 Interfering amplitudes	5-14
5-6 L'armamentario della meccanica quantistica	5-17	5-6 The machinery of quantum mechanics	5-17
5-7 Passaggio ad una base diversa	5-20	5-7 Transforming to a different base	5-20
5-8 Altri casi	5-22	5-8 Other situations	5-22
Capitolo 6 Spin un mezzo		Chapter 6 Spin One-Half	
6-1 Trasformazione delle ampiezze	6-1	6-1 Transforming amplitudes	6-1
6-2 Trasformazione ad un sistema di coordinate ruotato	6-4	6-2 Transforming to a rotated coordinate system	6-4
6-3 Rotazioni intorno all'asse z	6-8	6-3 Rotations about the z -axis	6-8
6-4 Rotazioni di 180° e di 90° intorno a y	6-12	6-4 Rotations of 180° and 90° about y	6-12
6-5 Rotazioni intorno all'asse x	6-16	6-5 Rotations about x	6-16
6-6 Rotazioni arbitrarie	6-18	6-6 Arbitrary rotations	6-18
Capitolo 7 La dipendenza delle ampiezze dal tempo		Chapter 7 The Dependence of Amplitudes on Time	
7-1 Atomi in quiete; stati stazionari	7-1	7-1 Atoms at rest; stationary states	7-1
7-2 Moto uniforme	7-4	7-2 Uniform motion	7-4
7-3 Energia potenziale; conservazione dell'energia	7-8	7-3 Potential energy; energy conservation	7-8
7-4 Forze; il limite classico	7-13	7-4 Forces; the classical limit	7-13
7-5 La "precessione" di una particella a spin un mezzo	7-15	7-5 The "precession" of a spin one-half particle	7-15
Capitolo 8 La matrice Hamiltoniana		Chapter 8 The Hamiltonian Matrix	
8-1 Ampiezze e vettori	8-1	8-1 Amplitudes and vectors	8-1
8-2 Decomposizione dei vettori di stato	8-3	8-2 Resolving state vectors	8-3
8-3 Quali sono gli stati di base dell'universo?	8-7	8-3 What are the base states of the world?	8-7
8-4 Come gli stati cambiano col tempo	8-9	8-4 How states change with time	8-9
8-5 La matrice Hamiltoniana	8-13	8-5 The Hamiltonian matrix	8-13
8-6 La molecola di ammoniaca	8-14	8-6 The ammonia molecule	8-14
Capitolo 9 Il maser ad ammoniaca		Chapter 9 The Ammonia Maser	
9-1 Gli stati di una molecola di ammoniaca	9-1	9-1 The states of an ammonia molecule	9-1
9-2 La molecola in un campo elettrico stazionario	9-6	9-2 The molecule in a static electric field	9-6
9-3 Transizioni in un campo dipendente dal tempo	9-12	9-3 Transitions in a time-dependent field	9-12
9-4 Transizioni alla risonanza	9-15	9-4 Transitions at resonance	9-15
9-5 Transizioni lontano dalla risonanza	9-18	9-5 Transitions off resonance	9-18
9-6 L'assorbimento della luce	9-19	9-6 The absorption of light	9-19
Capitolo 10 Altri sistemi a due stati		Chapter 10 Other Two-State Systems	
10-1 Lo ione di idrogeno molecolare	10-1	10-1 The hydrogen molecular ion	10-1

10-2	Forze nucleari	10-8
10-3	La molecola d'idrogeno	10-11
10-4	La molecola del benzolo	10-14
10-5	Coloranti	10-17
10-6	L'Hamiltoniana di una particella a spin un mezzo in un campo magnetico	10-18
10-7	L'elettrone con spin in un campo magnetico	10-21

Capitolo 11 Ancora sui sistemi a due stati

11-1	Le matrici di spin di Pauli	11-1
11-2	Le matrici di spin come operatori	11-7
11-3	La soluzione delle equazioni per i sistemi a due stati	11-11
11-4	Gli stati di polarizzazione del fotone	11-13
11-5	Il mesone K neutro	11-18
11-6	Generalizzazione ai sistemi ad N stati	11-29

Capitolo 12 La struttura iperfine dell'idrogeno

12-1	Stati di base per un sistema di due particelle a spin un mezzo	12-1
12-2	L'Hamiltoniana per lo stato fondamentale dell'idrogeno	12-4
12-3	I livelli di energia	12-10
12-4	L'effetto Zeeman	12-13
12-5	Gli stati in un campo magnetico	12-17
12-6	La matrice di proiezione per lo spin uno	12-20

Capitolo 13 Propagazione in un reticolo cristallino

13-1	Stati di un elettrone in un reticolo unidimensionale	13-1
13-2	Stati di energia definita	13-2
13-3	Stati che dipendono dal tempo	13-9
13-4	L'elettrone in un reticolo tridimensionale	13-11
13-5	Altri possibili stati in un reticolo	13-12
13-6	Diffusione da parte delle imperfezioni di un reticolo	13-14
13-7	Cattura da parte di una imperfezione del reticolo	13-17
13-8	Ampiezze di diffusione e stati legati	13-18

Capitolo 14 Semiconduttori

14-1	Elettroni e lacune nei semiconduttori	14-1
14-2	Semiconduttori impuri	14-7
14-3	L'effetto Hall	14-10
14-4	Giunzioni a semiconduttori	14-12
14-5	La giunzione a semiconduttore come raddrizzatore	14-16
14-6	Il transistor	14-18

10-2	Nuclear forces	10-8
10-3	The hydrogen molecule	10-11
10-4	The benzene molecule	10-14
10-5	Dyes	10-17
10-6	The Hamiltonian of a spin one-half particle in a magnetic field	10-18
10-7	The spinning electron in a magnetic field	10-21

Chapter 11 More Two-State Systems

11-1	The Pauli spin matrices	11-1
11-2	The spin matrices as operators	11-7
11-3	The solution of the two-state equations	11-11
11-4	The polarization states of the photon	11-13
11-5	The neutral K-meson	11-18
11-6	Generalization to N-state systems	11-29

Chapter 12 The Hyperfine Splitting in Hydrogen

12-1	Base states for a system with two spin one-half particles	12-1
12-2	The Hamiltonian for the ground state of hydrogen	12-4
12-3	The energy levels	12-10
12-4	The Zeeman splitting	12-13
12-5	The states in a magnetic field	12-17
12-6	The projection matrix for spin one	12-20

Chapter 13 Propagation in a Crystal Lattice

13-1	States for an electron in a one-dimensional lattice	13-1
13-2	States of definite energy	13-2
13-3	Time-dependent states	13-9
13-4	An electron in a three-dimensional lattice	13-11
13-5	Other states in a lattice	13-12
13-6	Scattering by imperfections in the lattice	13-14
13-7	Trapping by a lattice imperfection	13-17
13-8	Scattering amplitudes and bound states	13-18

Chapter 14 Semiconductors

14-1	Electrons and holes in semiconductors	14-1
14-2	Impure semiconductors	14-7
14-3	The Hall effect	14-10
14-4	Semiconductor junctions	14-12
14-5	Rectification at a semiconductor junction	14-16
14-6	The transistor	14-18

Capitolo 15	L'approssimazione a particelle indipendenti	
15-1	Onde di spin	15-1
15-2	Due onde di spin	15-6
15-3	Particelle indipendenti	15-8
15-4	La molecola del benzolo	15-10
15-5	Ancora un po' di chimica organica	15-15
15-6	Altri usi di questa approssimazione	15-20
Capitolo 16	Dipendenza delle ampiezze della posizione	
16-1	Ampiezze in una dimensione	16-1
16-2	La funzione d'onda	16-6
16-3	Stati di impulso definito	16-9
16-4	Normalizzazione degli stati in x	16-12
16-5	L'equazione di Schrödinger	16-15
16-6	Livelli energetici quantizzati	16-19
Capitolo 17	Simmetria e leggi di conservazione	
17-1	Simmetria	17-1
17-2	Simmetria e leggi di conservazione	17-5
17-3	Leggi di conservazione	17-10
17-4	Luce polarizzata	17-14
17-5	La disintegrazione della A^*	17-17
17-6	Sommario delle matrici di rotazione	17-22
Capitolo 18	Il momento angolare	
18-1	Radiazione di dipolo elettrico	18-1
18-2	Diffusione della luce	18-5
18-3	Annichilazione del positronio	18-7
18-4	Matrice di rotazione per uno spin qualsiasi	18-14
18-5	Misura di uno spin nucleare	18-19
18-6	Composizione dei momenti angolari	18-21
	Nota aggiuntiva 1: Deduzione della matrice di rotazione	18-28
	Nota aggiuntiva 2: Conservazione della parità nell'emissione di un fotone	18-31
Capitolo 19	L'atomo di idrogeno ed il sistema periodico degli elementi	
19-1	L'equazione di Schrödinger per l'atomo di idrogeno	19-1
19-2	Soluzioni a simmetria sferica	19-3
19-3	Stati con dipendenza angolare	19-8
19-4	La soluzione generale per l'idrogeno	19-14
19-5	Le funzioni d'onda dell'idrogeno	19-18
19-6	Il sistema periodico	19-20

Chapter 15	The Independent Particle Approximation	
15-1	Spin waves	15-1
15-2	Two spin waves	15-6
15-3	Independent particles	15-8
15-4	The benzene molecule	15-10
15-5	More organic chemistry	15-15
15-6	Other uses of the approximation	15-20
Chapter 16	The Dependence of Amplitudes on Position	
16-1	Amplitudes on a line	16-1
16-2	The wave function	16-6
16-3	States of definite momentum	16-9
16-4	Normalization of the states in x	16-12
16-5	The Schrödinger equation	16-15
16-6	Quantized energy levels	16-19
Chapter 17	Symmetry and Conservation Laws	
17-1	Symmetry	17-1
17-2	Symmetry and conservation	17-5
17-3	The conservation laws	17-10
17-4	Polarized light	17-14
17-5	The disintegration of the A^*	17-17
17-6	Summary of the rotation matrices	17-22
Chapter 18	Angular Momentum	
18-1	Electric dipole radiation	18-1
18-2	Light scattering	18-5
18-3	The annihilation of positronium	18-7
18-4	Rotation matrix for any spin	18-14
18-5	Measuring a nuclear spin	18-19
18-6	Composition of angular momentum	18-21
	Added Note 1: Derivation of the rotation matrix	18-28
	Added Note 2: Conservation of parity in photon emission	18-31
Chapter 19	The Hydrogen Atom and the Periodic Table	
19-1	Schrödinger's equation for the hydrogen atom	19-1
19-2	Spherically symmetric solutions	19-3
19-3	States with an angular dependence	19-8
19-4	The general solution for hydrogen	19-14
19-5	The hydrogen wave functions	19-18
19-6	The periodic table	19-20

Capitolo 20 Operatori

20-1	Operazioni ed operatori	20-1
20-2	Energie medie	20-4
20-3	L'energia media di un atomo	20-8
20-4	L'operatore di posizione	20-10
20-5	L'operatore dell'impulso	20-12
20-6	Il momento angolare	20-18
20-7	Variazione dei valori medi col tempo	20-21

Capitolo 21 L'equazione di Schrödinger in un contesto classico: un seminario sulla superconduttività

21-1	L'equazione di Schrödinger in presenza di un campo magnetico	21-1
21-2	L'equazione di continuità per le probabilità	21-4
21-3	Due tipi di impulso	21-6
21-4	Il significato della funzione d'onda	21-8
21-5	La superconduttività	21-9
21-6	L'effetto Meissner	21-11
21-7	Quantizzazione del flusso	21-14
21-8	La dinamica della superconduttività	21-17
21-9	La giunzione di Josephson	21-20

Parole conclusive di Feynman 21-27

Appendice 21-28

Indice analitico

Chapter 20 Operators

20-1	Operations and operators	20-1
20-2	Average energies	20-4
20-3	The average energy of an atom	20-8
20-4	The position operator	20-10
20-5	The momentum operator	20-12
20-6	Angular momentum	20-18
20-7	The change of averages with time	20-21

Chapter 21 The Schrödinger Equation in a Classical Context: A Seminar on Superconductivity

21-1	Schrödinger's equation in a magnetic field	21-1
21-2	The equation of continuity for probabilities	21-4
21-3	Two kinds of momentum	21-6
21-4	The meaning of the wave function	21-8
21-5	Superconductivity	21-9
21-6	The Meissner effect	21-11
21-7	Flux quantization	21-14
21-8	The dynamics of superconductivity	21-17
21-9	The Josephson junction	21-20

Feynman's Epilogue 21-27

Appendix 21-28

Index