

Luigi E. Picasso

Lezioni  
di  
Meccanica Quantistica

seconda edizione

Edizioni ETS



[www.edizioniets.com](http://www.edizioniets.com)

© Copyright 2015  
EDIZIONI ETS  
Piazza Carrara, 16-19, I-56126 Pisa  
[info@edizioniets.com](mailto:info@edizioniets.com)  
[www.edizioniets.com](http://www.edizioniets.com)

*Distribuzione*  
Messagerie Libri SPA  
Sede legale: via G. Verdi 8 - 20090 Assago (MI)

*Promozione*  
PDE PROMOZIONE SRL  
via Zago 2/2 - 40128 Bologna

ISBN 978-884674310-7

---

# Indice

<b>1</b>	<b>La Crisi della Fisica Classica</b>	
1.1	Modelli Atomici .....	1
1.2	Il Problema delle Dimensioni Atomiche e del Collasso per Irraggiamento	4
1.3	Difficoltà Connesse con i Calori Specifici .....	7
1.4	L'Effetto Fotoelettrico .....	11
<b>2</b>	<b>Da Einstein a de Broglie</b>	
2.1	I Fotoni .....	14
2.2	L'Effetto Compton .....	16
2.3	Generalità sugli Spettri. Le Ipotesi di Bohr .....	17
2.4	I Livelli Energetici dell'Idrogeno Secondo Bohr .....	19
2.5	Livelli dell'Oscillatore e di una Particella su un Segmento .....	23
2.6	Teorie di Einstein e di Debye dei Calori Specifici dei Solidi .....	25
2.7	I Calori Specifici dei Gas .....	31
2.8	Comportamento ondulatorio delle particelle: esperimenti di Bragg e di Davisson e Germer .....	35
<b>3</b>	<b>Introduzione ai Postulati della Meccanica Quantistica</b>	
3.1	Introduzione .....	39
3.2	L'Interferometro di Mach e Zehnder .....	40
3.3	Esperimenti di Interferenza con Singoli Fotoni .....	41
3.4	Descrizione degli Stati di Polarizzazione di un Fotone .....	45
3.5	Discussione degli Esperimenti con il Polaroid .....	47
3.6	Misure Compatibili e Misure Incompatibili. Il Principio di Indeterminazione di Heisenberg .....	52
<b>4</b>	<b>I Postulati della Meccanica Quantistica</b>	
4.1	Il Principio di Sovrapposizione .....	56
4.2	Osservabili .....	58
4.3	Probabilità di Transizione .....	61
4.4	Conseguenze e Postulato di von Neumann .....	62
4.5	Operatori Associati alle Osservabili .....	66
4.6	Proprietà degli Operatori Associati alle Osservabili .....	68
4.7	Digressione sulla Notazione di Dirac .....	70
4.8	Valori Medi .....	72
4.9	Stati Puri e Miscele Statistiche .....	74
4.10	Osservabili Compatibili .....	78

4.11	Relazioni di Indeterminazione .....	82
4.12	Postulato di Quantizzazione .....	83
<b>5</b>	<b>L'Oscillatore Armonico</b>	
5.1	Positività degli Autovalori dell'Energia .....	87
5.2	I Livelli Energetici dell'Oscillatore Armonico .....	89
<b>6</b>	<b>Teoria delle Rappresentazioni</b>	
6.1	Rappresentazioni .....	93
6.2	La Rappresentazione di Heisenberg per l'Oscillatore Armonico .....	96
6.3	Trasformazioni Unitarie e il Teorema di von Neumann .....	97
6.4	La Rappresentazione di Schrödinger: Considerazioni Preliminari .....	101
6.5	La Rappresentazione di Schrödinger .....	103
6.6	Interpretazione Fisica delle Rappresentazioni di Schrödinger e degli Impulsi .....	109
6.7	Gli Autovettori Impropri delle $q_i$ e delle $p_i$ .....	112
6.8	Relazione fra le Rappresentazioni delle Coordinate e degli Impulsi ...	115
6.9	Le $q$ e le $p$ come Osservabili .....	118
<b>7</b>	<b>L'Equazione di Schrödinger per Sistemi Unidimensionali</b>	
7.1	La Hamiltoniana della Particella Libera .....	122
7.2	Il teorema di Degenerazione. Inversioni Spaziali .....	124
7.3	Caratteristiche Generali delle Soluzioni dell'Equazione di Schrödinger nel Caso Unidimensionale .....	127
7.4	Le Soluzioni dell'Equazione di Schrödinger: Autovalori Discreti .....	130
7.5	Le Soluzioni dell'Equazione di Schrödinger: Autovalori Continui .....	133
<b>8</b>	<b>Sistemi Unidimensionali</b>	
8.1	L'oscillatore armonico unidimensionale in Rappresentazione di Schrödinger .....	137
8.2	Buca di Potenziale .....	140
8.3	L'Effetto Tunnel .....	144
<b>9</b>	<b>Evoluzione Temporale</b>	
9.1	L'Evoluzione Temporale nello Schema di Schrödinger .....	149
9.2	L'Evoluzione Temporale nello Schema di Heisenberg .....	155
9.3	Il Limite Classico della Meccanica Quantistica .....	158
<b>10</b>	<b>Il Momento Angolare</b>	
10.1	Il Momento Angolare: Regole di Commutazione .....	162
10.2	Il Momento Angolare: Autovalori .....	165
10.3	Operatori di Rotazione .....	168
10.4	Il Momento Angolare Orbitale .....	169
<b>11</b>	<b>Particella in Campo Centrale</b>	
11.1	L'Equazione di Schrödinger in Campo Centrale .....	173
11.2	Sistemi di Due Particelle: Separazione delle Variabili .....	176
11.3	Livelli Energetici degli Idrogenoidi .....	179
11.4	L'Oscillatore Armonico Tridimensionale Isotropo .....	184

<b>12</b>	<b>Perturbazioni ai Livelli Energetici</b>	
12.1	Teoria delle Perturbazioni: Trattazione Euristica .....	187
12.2	L'Effetto Stark nell'Idrogeno .....	190
12.3	Teoria delle Perturbazioni al Primo Ordine: Trattazione Formale .....	195
12.4	Teoria delle Perturbazioni al Secondo Ordine e il Caso dei Livelli Quasi Degeneri .....	197
<b>13</b>	<b>Transizioni Elettromagnetiche</b>	
13.1	Introduzione .....	201
13.2	La Teoria delle Perturbazioni per l'Evoluzione Temporale .....	202
13.3	La Teoria Semiclassica dell'Irraggiamento .....	205
13.4	L'Emissione Spontanea .....	208
13.5	Transizioni di Dipolo Elettrico .....	211
13.6	Regole di Selezione I .....	213
13.7	Atomo in Campo Magnetico: l'Effetto Zeeman Normale .....	217
13.8	Polarizzazione e Distribuzione Angolare della Radiazione Emessa .....	221
13.9	La Vita Media del Livello $n = 2$ dell'Atomo di Idrogeno .....	224
<b>14</b>	<b>Introduzione alla Fisica Atomica</b>	
14.1	L'Approssimazione di Campo Centrale .....	228
14.2	Il Metodo Variazionale .....	232
14.3	Il Livello Fondamentale dell'Elio .....	233
14.4	Gli Atomi Alcalini .....	236
14.5	Trattazione Quantistica degli Atomi Alcalini .....	240
<b>15</b>	<b>Sistemi Composti. Il Principio di Pauli</b>	
15.1	Lo Spazio degli Stati per un Sistema di più Particelle: Prodotto Tensoriale di Spazi di Hilbert .....	246
15.2	Lo Spin dell'Elettrone .....	248
15.3	Composizione di Momenti Angulari .....	251
15.4	Il Principio di Esclusione di Pauli .....	255
<b>16</b>	<b>Atomi con più Elettroni</b>	
16.1	I Livelli dell'Atomo di Elio .....	261
16.2	Classificazione dei Livelli Atomici .....	265
16.3	Relazione fra Configurazione Elettronica e Termini Spettroscopici: l'Atomo di Carbonio .....	268
16.4	Interazione Spin-Orbita. Struttura Fine dei Livelli .....	272
16.5	Gerarchia dei Numeri Quantici. Regole di Selezione II .....	279
16.6	Atomo in Campo Magnetico: l'Effetto Zeeman Anomalo .....	282
<b>17</b>	<b>Teoria Elementare dello Scattering</b>	
17.1	Introduzione .....	291
17.2	La Sezione d'Urto .....	292
17.3	Il Caso Unidimensionale .....	293
17.4	Il Caso Tridimensionale .....	296
17.5	Il Teorema Ottico .....	300
17.6	Potenziale Centrale .....	302

17.7	Applicazioni .....	305
17.8	Urto fra Particelle Identiche .....	308
17.9	Il Teorema di Reciprocità e il Bilancio Dettagliato .....	310
<b>18</b>	<b>I Paradossi della Meccanica Quantistica</b>	
18.1	Introduzione .....	312
18.2	La Scatola di de Broglie .....	313
18.3	Il Gatto di Schrödinger .....	315
18.4	Cos'è una Misura? .....	316
18.5	Il Paradosso di Einstein–Podolsky–Rosen .....	317
18.6	Il Teorema di Bell .....	320
	<b>Appendice - Valori Numerici delle Costanti</b> .....	<b>323</b>
	<b>Indice Analitico</b> .....	<b>325</b>