

Pérez | Carles | Pujol

Quantique

fondements et applications

avec 250 exercices et problèmes résolus



de boeck

Table des matières

Table des matières	v
Avant-Propos	xi
Notations et symboles	xiv
Constantes fondamentales	xiv
Notations	xv
Alphabet grec	xvii
Multiples en notation scientifique	xvii
Les grands noms de la physique	xviii
La quantique en vingt questions	xl
Leçons	1
1 Qu'est-ce que la quantique?	3
Les fondements de la physique classique	4
La constante de Planck	8
Les quatre interactions fondamentales	16
Les concepts de la quantique	19
Les fondements de la quantique	22
Les applications de la quantique	26
Les différentes synthèses en physique	30
2 Le photon : première approche	37
Rappel sur les ondes électromagnétiques	38
Rayonnement du corps noir	44
Effet photoélectrique	46
Effet Compton	50
Autres interactions lumière-matière	55
Détection et atténuation d'un rayonnement	58
3 Quantification de l'énergie des atomes	69
Spectre de raies de l'atome d'hydrogène	70
Interprétation historique de Bohr	71
Atomes hydrogénoïdes et muoniques	74

Excitation des atomes	77
Limites du modèle de Bohr	83
4 Relation de de Broglie. Inégalités d'Heisenberg	91
Hypothèse fondamentale de Louis de Broglie	91
Confirmations expérimentales	96
Interprétation probabiliste	103
Groupe d'ondes de probabilité	107
Inégalités spatiales d'Heisenberg	110
Effets de phase	115
5 Équation de Schrödinger. États libres	127
Équation de Schrödinger non relativiste	128
Courant de probabilité	133
États stationnaires d'un objet physique	135
États libres à une dimension	137
Flux d'objets physiques libres	140
Réflexion et transmission sur une marche	143
Applications	155
6 Effet tunnel et diffusion à une dimension	165
Mise en évidence expérimentale	166
Transmission par effet tunnel	168
Facteur de transmission en intensité	171
Interprétation de divers phénomènes	174
Applications de l'effet tunnel	178
Diffusion à une dimension	183
Analyse matricielle	187
7 Confinement quantique à une dimension	195
Approches classique et quantique	195
Puits rectangulaire infiniment profond	197
Approximation classique	202
Puits quantique de profondeur finie	204
Exemples physiques de puits	209
Mesures des grandeurs dans un état confiné	212
Représentation en quantité de mouvement	214
8 Oscillateur harmonique et excitations élémentaires	225
Oscillateur harmonique en physique classique	225
Oscillateur harmonique en quantique	227
Exemples et ordres de grandeur	232
Spectrométries de vibration	237

9 Systèmes à plusieurs dimensions	249
Systèmes à variables séparables	250
Prise en compte des symétries	251
Système 0 D et boîte quantique	255
Système 1D et fil quantique	258
Système 2 D et puits quantique	265
Systèmes 3 D	271
Réflexion et transmission	277
10 Couplage de puits quantiques : de l'atome au solide	291
Couplage de deux oscillateurs mécaniques	291
Couplage par effet tunnel de deux puits quantiques	301
Comparaison des cas classique et quantique	312
Autres exemples de couplage	313
Chaîne périodique d'oscillateurs classiques	316
Couplage tunnel d'une chaîne périodique de puits	319
11 Systèmes à deux états	333
États de polarisation de la lumière	334
Système de deux puits quantiques	338
Système quelconque à deux états	342
Application aux liaisons moléculaires	347
Systèmes à N états. Applications au solide	351
Échange et interférence quantiques	357
12 Rotation et moment cinétique	369
Faits expérimentaux	369
Rotateur plan	371
Moment cinétique orbital	376
Rotations moléculaires	382
Fluides quantiques en rotation	385
Effets de phase	392
13 Spin et magnétisme	405
Moments magnétiques et effet Zeeman	405
Moment cinétique intrinsèque ou spin	411
États de spin des systèmes. Qubit	413
Moment cinétique total d'un système	419
14 Atomes, noyaux et agrégats	433
Système à champ central	434
Atome d'hydrogène	435
Atomes à plusieurs électrons	447
Spectrométrie atomique	454

Structures nucléaires	458
Nano-objets et agrégats	463
États de diffusion	466
15 Absorption et émission. Coefficients d'Einstein	483
Processus d'interaction rayonnement-atome	484
Émission induite et loi de Planck	488
Amplification d'une onde par un milieu	494
Lasers et horloges atomiques	501
16 Battements, transitions et résonance	515
Évolution de l'état quantique d'un système	516
Évolution d'un système à deux états	521
Oscillations de Rabi et interaction faible	528
Effets Josephson	531
Transition entre deux états	536
Transition par une perturbation sinusoïdale	542
Résonance magnétique	549
17 Équation d'Heisenberg. États quasi classiques. Relaxation	563
Évolution des grandeurs physiques	563
Invariances et lois de conservation	567
Théorème d'Ehrenfest	570
États cohérents quasi classiques	573
Relaxation	577
18 Intrication, mesure et décohérence	597
Intrication et corrélations à distance	598
Argument EPR et inégalités de Bell	603
Tests expérimentaux de non-séparabilité	607
Communication quantique	613
Opérateur et matrice statistique	618
Mesure, décohérence et information	623
Tests de cohérence quantique	630
19 Optique quantique	645
Interféromètre d'Hanbury Brown et Twiss	645
Expériences à un photon	648
Coalescence de deux photons	657
Statistique de photons	659
Interféromètre HBT en optique quantique	667
Quantification du champ électromagnétique	673
États quasi classiques et états comprimés	687

20 Quantique relativiste	703
La relativité restreinte en quantique	703
Équation de Schrödinger-Klein-Gordon	707
Théorie de Dirac	713
Théorie quantique des champs	726
Annexes	745
1 Outils mathématiques de base	747
Nombres complexes	747
Fonctions hyperboliques	748
Développements limités au voisinage de zéro	749
Matrices	751
2 Lagrangien et hamiltonien	759
Lagrangien classique	759
Hamiltonien classique	762
Lagrangien et hamiltonien d'une charge	766
3 Analyse de Fourier	771
Séries de Fourier de fonctions périodiques	771
Transformation de Fourier	773
Extension aux distributions	779
Notations particulières en quantique	780
4 Espaces de Hilbert	783
Espaces hermitiens	783
Bases orthonormées	785
Opérateurs linéaires hermitiens	786
Inégalités	789
Représentations dans des bases continues	791
5 Lois de probabilité	795
Langage des probabilités	795
Probabilités	796
Variables aléatoires	798
Lois de probabilité	801
6 Simulation en quantique	807
Diffraction et interférence	808
Marche ou saut d'énergie potentielle	814
Barrière rectangulaire	818
Transmission tunnel résonnante	822
États confinés	830

Quantique

fondements et applications

Cet ouvrage, découpé en 20 leçons quasi autonomes, rassemble les fondements et les applications de la quantique.

Qu'est-ce que la quantique ?

Dans la première leçon, on présente la quantique, en soulignant les aspects historiques et épistémologiques de cette discipline, et en rappelant ses nombreuses implications, non seulement en physique atomique et moléculaire, mais aussi en physique nucléaire, en chimie, en physique de la matière condensée et dans le domaine émergent des nanosciences.

Aspects fondamentaux et applications

Le fil conducteur de l'ouvrage peut être résumé par le slogan « un maximum de physique avec un minimum de formalisme ». Ainsi, en appliquant l'équation de Schrödinger à des systèmes unidimensionnels, sont rapidement abordés les effets de confinement, de quantification, de tunnel et de diffusion. Dans ce contexte, l'évolution, le déterminisme, l'indiscernabilité, la superposition d'états et l'intrication, qui sont analysés en détail dans la seconde moitié de l'ouvrage, sont très tôt considérés.

En outre, sont examinés les progrès considérables apparus au cours des dernières décennies, tant sur le plan fondamental, avec la levée des divers paradoxes, que sur le développement de l'optique quantique et des multiples applications en métrologie. L'ouvrage se termine par une ouverture relativiste rendue nécessaire par les progrès qu'ont permis, sur le plan de la pensée et des applications, la théorie de Dirac et l'électrodynamique quantique.

De nombreux exemples, plus de 250 exercices et problèmes résolus

L'ouvrage s'adresse d'abord aux étudiants de licence (L2, L3) et de la première année du master (M1), mais sa présentation didactique, avec ses nombreux exemples et ses 250 exercices et problèmes résolus, ainsi que l'accent mis sur le développement historique et épistémologique, devraient aussi intéresser les candidats aux concours de l'enseignement (CAPES, agrégations, etc.), et plus largement toutes les personnes concernées par la physique et son impact dans toutes les autres disciplines scientifiques, voire même en philosophie.

Les auteurs

José-Philippe Pérez, Professeur émérite de l'Université de Toulouse, UPS-IRAP.

Robert Carles, Professeur à l'Université de Toulouse, UPS-CEMES.

Olivier Pujol, Maître de conférences à l'Université de Lille, LOA.

- **Ouvrage construit en 20 leçons, progressives et quasi autonomes**
- **Fondements, ordres de grandeurs et applications concrètes**
- **Développement historique et épistémologique**
- **Aspect plus actuel : introduction à la théorie quantique des champs**
- **De nombreux exemples, 250 exercices et problèmes résolus**
- **Annexes mathématiques et simulations numériques**

ISBN : 978-2-8041-0778-9



9 782804 107789

PHYQUANPER



de boeck

www.deboeck.com