

# **MÉCANIQUE QUANTIQUE**

**Collection Enseignement des sciences, 16**



---

# Table

---

## TOME I

	Introduction . . . . .	3
<b>Chapitre I</b>	<b>Ondes et particules. Introduction aux idées fondamentales de la mécanique quantique . . . . .</b>	<b>8</b>
	A. <i>Ondes électromagnétiques et photons . . . . .</i>	10
	B. <i>Corpuscules matériels et ondes de matière . . . . .</i>	18
	C. <i>Description quantique d'une particule. Paquets d'ondes. . . . .</i>	22
	D. <i>Particule dans un potentiel scalaire indépendant du temps . . . . .</i>	32
 <b>Compléments du Chapitre I.</b>		
	GUIDE DE LECTURE . . . . .	42
	A <sub>1</sub> . <i>Ordre de grandeur des longueurs d'onde associées à des corpuscules matériels . . . . .</i>	43
	B <sub>1</sub> . <i>Contraintes imposées par la relation d'incertitude . . . . .</i>	46
	C <sub>1</sub> . <i>Relation d'incertitude et paramètres atomiques . . . . .</i>	48
	D <sub>1</sub> . <i>Une expérience illustrant la relation d'incertitude . . . . .</i>	51
	E <sub>1</sub> . <i>Etude simple d'un paquet d'ondes à deux dimensions . . . . .</i>	54
	F <sub>1</sub> . <i>Lien entre les problèmes à une et à trois dimensions . . . . .</i>	58
	G <sub>1</sub> . <i>Paquet d'ondes gaussien à une dimension; étalement du paquet d'ondes . . . . .</i>	62
	H <sub>1</sub> . <i>États stationnaires d'une particule dans des potentiels carrés à une dimension . . . . .</i>	68
	J <sub>1</sub> . <i>Comportement d'un paquet d'ondes dans une marche de potentiel . . . . .</i>	80
	K <sub>1</sub> . <i>Exercices . . . . .</i>	87

<b>Chapitre II</b>	<b>Les outils mathématiques de la mécanique quantique</b>	92
A.	<i>Espace des fonctions d'onde d'une particule . . . . .</i>	94
B.	<i>Espace des états. Notations de Dirac . . . . .</i>	108
C.	<i>Représentations dans l'espace des états . . . . .</i>	121
D.	<i>Équations aux valeurs propres. Observables. . . . .</i>	132
E.	<i>Deux exemples importants de représentations et d'observables . . . . .</i>	144
F.	<i>Produit tensoriel d'espaces d'états . . . . .</i>	153

### Compléments du Chapitre II.

	GUIDE DE LECTURE . . . . .	164
A <sub>II</sub> .	<i>Inégalité de Schwarz . . . . .</i>	165
B <sub>II</sub> .	<i>Rappel de quelques propriétés utiles des opérateurs linéaires . . . . .</i>	166
C <sub>II</sub> .	<i>Opérateurs unitaires . . . . .</i>	176
D <sub>II</sub> .	<i>Étude plus détaillée des représentations <math>\{  r\rangle \}</math> et <math>\{  p\rangle \}</math> . . . . .</i>	182
E <sub>II</sub> .	<i>Quelques propriétés générales de deux observables <math>Q</math> et <math>P</math> dont le commutateur est égal à <math>i\hbar</math>. . . . .</i>	187
F <sub>II</sub> .	<i>Opérateur parité . . . . .</i>	192
G <sub>II</sub> .	<i>Application des propriétés du produit tensoriel : puits infini à deux dimensions . . . . .</i>	199
H <sub>II</sub> .	<i>Exercices. . . . .</i>	203

### Chapitre III Les postulats de la mécanique quantique . . . . . 212

A.	<i>Introduction . . . . .</i>	213
B.	<i>Énoncé des postulats . . . . .</i>	214
C.	<i>Interprétation physique des postulats sur les observables et leur mesure . . . . .</i>	225
D.	<i>Contenu physique de l'équation de Schrödinger . . . . .</i>	236
E.	<i>Principe de superposition et prévisions physiques . . . . .</i>	252

### Compléments du Chapitre III.

	GUIDE DE LECTURE . . . . .	267
A <sub>III</sub> .	<i>Particule dans un puits de potentiel infini : étude physique . . . . .</i>	269
B <sub>III</sub> .	<i>Étude du courant de probabilité dans quelques cas particuliers . . . . .</i>	280
C <sub>III</sub> .	<i>Écart quadratique moyen de deux observables conjuguées . . . . .</i>	286
D <sub>III</sub> .	<i>Mesures portant sur une partie seulement d'un système physique . . . . .</i>	290
E <sub>III</sub> .	<i>L'opérateur densité . . . . .</i>	295
F <sub>III</sub> .	<i>Opérateur d'évolution . . . . .</i>	308
G <sub>III</sub> .	<i>Points de vue de Schrödinger et de Heisenberg . . . . .</i>	311
H <sub>III</sub> .	<i>Invariance de jauge . . . . .</i>	314
J <sub>III</sub> .	<i>Propagateur de l'équation de Schrödinger . . . . .</i>	328
K <sub>III</sub> .	<i>Niveaux instables. Durée de vie . . . . .</i>	336
L <sub>III</sub> .	<i>Exercices. . . . .</i>	340

M <sub>III</sub> .	États liés d'une particule dans un « puits de potentiel » de forme quelconque . . . . .	350
N <sub>III</sub> .	États non-liés d'une particule en présence d'un puits ou d'une barrière de potentiel de forme quelconque . . . . .	358
O <sub>III</sub> .	Propriétés quantiques d'une particule dans une structure périodique à une dimension . . . . .	366
<b>Chapitre IV</b>	<b>Application des postulats à des cas simples : spin 1/2 et systèmes à deux niveaux . . . . .</b>	<b>384</b>
A.	Particule de spin 1/2 : quantification du moment cinétique . . . . .	386
B.	Illustration des postulats sur le cas d'un spin 1/2 . . . . .	393
C.	Étude générale des systèmes à deux niveaux . . . . .	403
<b>Compléments du Chapitre IV.</b>		
	GUIDE DE LECTURE . . . . .	414
A <sub>IV</sub> .	Les matrices de Pauli . . . . .	415
B <sub>IV</sub> .	Diagonalisation d'une matrice hermitique $2 \times 2$ . . . . .	418
C <sub>IV</sub> .	Spin fictif 1/2 associé à un système à deux niveaux . . . . .	423
D <sub>IV</sub> .	Système de deux spins 1/2 . . . . .	429
E <sub>IV</sub> .	Matrice densité d'un spin 1/2 . . . . .	436
F <sub>IV</sub> .	Spin 1/2 dans un champ magnétique statique et un champ tournant : résonance magnétique . . . . .	441
G <sub>IV</sub> .	Étude de la molécule d'ammoniac au moyen d'un modèle simple . . . . .	453
H <sub>IV</sub> .	Effets d'un couplage entre un état stable et un état instable . . . . .	468
J <sub>IV</sub> .	Exercices . . . . .	474
<b>Chapitre V</b>	<b>L'oscillateur harmonique à une dimension . . . . .</b>	<b>480</b>
A.	Introduction . . . . .	481
B.	Valeurs propres de l'hamiltonien . . . . .	486
C.	États propres de l'hamiltonien . . . . .	494
D.	Discussion physique . . . . .	501
<b>Compléments du Chapitre V.</b>		
	GUIDE DE LECTURE . . . . .	508
A <sub>V</sub> .	Étude de quelques exemples physiques d'oscillateurs harmoniques . . . . .	510
B <sub>V</sub> .	Étude des états stationnaires en représentation $\{  x\rangle \}$ . Polynômes d'Hermite . . . . .	529
C <sub>V</sub> .	Résolution de l'équation aux valeurs propres de l'oscillateur harmonique par la méthode polynômiale . . . . .	535
D <sub>V</sub> .	Étude des états stationnaires en représentation $\{  p\rangle \}$ . . . . .	542
E <sub>V</sub> .	L'oscillateur harmonique isotrope à trois dimensions . . . . .	547

TABLE

F <sub>V</sub> .	Oscillateur harmonique chargé placé dans un champ électrique uniforme . . . . .	552
G <sub>V</sub> .	États cohérents « quasi classiques » de l'oscillateur harmonique	560
H <sub>V</sub> .	Modes propres de vibration de deux oscillateurs harmoniques couplés. . . . .	576
J <sub>V</sub> .	Modes de vibration d'une chaîne linéaire indéfinie d'oscillateurs harmoniques couplés; phonons . . . . .	587
K <sub>V</sub> .	Modes de vibration d'un système physique continu. Application au rayonnement : photons . . . . .	607
L <sub>V</sub> .	Oscillateur harmonique à une dimension en équilibre thermodynamique à la température $T$ . . . . .	623
M <sub>V</sub> .	Exercices. . . . .	638
<b>Chapitre VI</b>	<b>Propriétés générales des moments cinétiques en mécanique quantique . . . . .</b>	<b>646</b>
A.	Introduction : Importance du moment cinétique . . . . .	647
B.	Relations de commutation caractéristiques des moments cinétiques	648
C.	Théorie générale du moment cinétique . . . . .	651
D.	Application au moment cinétique orbital . . . . .	666
<b>Compléments du Chapitre VI.</b>		
	GUIDE DE LECTURE . . . . .	683
A <sub>VI</sub> .	Les harmoniques sphériques . . . . .	684
B <sub>VI</sub> .	Moment cinétique et rotations . . . . .	697
C <sub>VI</sub> .	Rotation des molécules diatomiques. . . . .	720
D <sub>VI</sub> .	Moment cinétique des états stationnaires d'un oscillateur harmonique à deux dimensions . . . . .	736
E <sub>VI</sub> .	Particule chargée dans un champ magnétique; niveaux de Landau	751
F <sub>VI</sub> .	Exercices. . . . .	775
<b>Chapitre VII</b>	<b>Particule dans un potentiel central. Atome d'hydrogène . . . . .</b>	<b>784</b>
A.	États stationnaires d'une particule dans un potentiel central . .	786
B.	Mouvement du centre de masse et mouvement relatif pour un système de deux particules en interaction . . . . .	795
C.	L'atome d'hydrogène . . . . .	801

**Compléments du Chapitre VII.**

GUIDE DE LECTURE . . . . .	814
A <sub>VII</sub> . <i>Systèmes hydrogénoïdes</i> . . . . .	815
B <sub>VII</sub> . <i>Exemple soluble de potentiel central : l'oscillateur harmonique isotrope à trois dimensions</i> . . . . .	824
C <sub>VII</sub> . <i>Courants de probabilité associés aux états stationnaires de l'atome d'hydrogène</i> . . . . .	834
D <sub>VII</sub> . <i>Atome d'hydrogène plongé dans un champ magnétique uniforme. Paramagnétisme et diamagnétisme. Effet Zeeman</i> . . . . .	839
E <sub>VII</sub> . <i>Étude de quelques orbitales atomiques. Orbitales hybrides</i> . . . . .	852
F <sub>VII</sub> . <i>Niveaux de vibration-rotation des molécules diatomiques</i> . . . . .	867
G <sub>VII</sub> . <i>Exercices</i> . . . . .	881
BIBLIOGRAPHIE . . . . .	882 A
INDEX . . . . .	883

**TOME II**

<b>Chapitre VIII</b> <b>Notions élémentaires sur la théorie quantique de la diffusion par un potentiel</b> . . . . .	891
A. <i>Introduction</i> . . . . .	893
B. <i>États stationnaires de diffusion. Calcul de la section efficace</i> . . . . .	897
C. <i>Diffusion par un potentiel central. Méthode des déphasages</i> . . . . .	912

**Compléments du Chapitre VIII.**

GUIDE DE LECTURE . . . . .	927
A <sub>VIII</sub> . <i>La particule libre : états stationnaires de moment cinétique bien défini</i> . . . . .	928
B <sub>VIII</sub> . <i>Description phénoménologique des collisions avec absorption</i> . . . . .	940
C <sub>VIII</sub> . <i>Exemples simples d'application de la théorie de la diffusion</i> . . . . .	946

<b>Chapitre IX</b>	<b>Le spin de l'électron . . . . .</b>	<b>955</b>
	A. <i>Introduction du spin de l'électron . . . . .</i>	958
	B. <i>Propriétés particulières d'un moment cinétique 1/2 . . . . .</i>	962
	C. <i>Description non-relativiste d'une particule de spin 1/2 . . . . .</i>	963
 <b>Compléments du Chapitre IX.</b>		
	GUIDE DE LECTURE . . . . .	971
	A <sub>IX</sub> . <i>Opérateurs de rotation pour une particule de spin 1/2 . . . . .</i>	972
	B <sub>IX</sub> . <i>Exercices . . . . .</i>	979
<b>Chapitre X</b>	<b>Composition des moments cinétiques . . . . .</b>	<b>987</b>
	A. <i>Introduction . . . . .</i>	989
	B. <i>Composition de deux spins 1/2. Méthode élémentaire . . . . .</i>	993
	C. <i>Composition de deux moments cinétiques quelconques. Méthode générale . . . . .</i>	999
 <b>Compléments du Chapitre X.</b>		
	GUIDE DE LECTURE . . . . .	1015
	A <sub>X</sub> . <i>Exemples de composition de moments cinétiques . . . . .</i>	1017
	B <sub>X</sub> . <i>Coefficients de Clebsch-Gordan . . . . .</i>	1025
	C <sub>X</sub> . <i>Composition des harmoniques sphériques . . . . .</i>	1033
	D <sub>X</sub> . <i>Opérateurs vectoriels : théorème de Wigner-Eckart . . . . .</i>	1038
	E <sub>X</sub> . <i>Moments multipolaires électriques . . . . .</i>	1049
	F <sub>X</sub> . <i>Évolution de deux moments cinétiques <math>\mathbf{J}_1</math> et <math>\mathbf{J}_2</math> couplés par une interaction <math>a\mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{J}_2</math> . . . . .</i>	1062
	G <sub>X</sub> . <i>Exercices . . . . .</i>	1076
<b>Chapitre XI</b>	<b>Théorie des perturbations stationnaires . . . . .</b>	<b>1083</b>
	A. <i>Exposé de la méthode . . . . .</i>	1085
	B. <i>Perturbation d'un niveau non-dégénéré . . . . .</i>	1090
	C. <i>Perturbation d'un niveau dégénéré . . . . .</i>	1094



**Compléments du Chapitre XI.**

GUIDE DE LECTURE . . . . .	1099
A <sub>XI</sub> . Oscillateur harmonique à une dimension soumis à un potentiel perturbateur en $x$ , $x^2$ , $x^3$ . . . . .	1100
B <sub>XI</sub> . Interaction entre les dipôles magnétiques de deux particules de spin $1/2$ . . . . .	1110
C <sub>XI</sub> . Forces de Van der Waals . . . . .	1120
D <sub>XI</sub> . Effet de volume : influence de l'extension spatiale du noyau sur les niveaux atomiques . . . . .	1131
E <sub>XI</sub> . La méthode des variations . . . . .	1138
F <sub>XI</sub> . Bandes d'énergie des électrons dans les solides : modèle simple	1146
G <sub>XI</sub> . Exemple simple de liaison chimique : l'ion $H_2^+$ . . . . .	1159
H <sub>XI</sub> . Exercices . . . . .	1190

**Chapitre XII Application de la théorie des perturbations : structure fine et hyperfine de l'atome d'hydrogène . . . . . 1201**

A. Introduction . . . . .	1204
B. Termes supplémentaires dans l'hamiltonien . . . . .	1205
C. Structure fine du niveau $n = 2$ . . . . .	1211
D. Structure hyperfine du niveau $n = 1$ . . . . .	1219
E. Effet Zeeman de structure hyperfine du niveau fondamental $1s$ . . . . .	1224

**Compléments du Chapitre XII.**

GUIDE DE LECTURE . . . . .	1238
A <sub>XII</sub> . Hamiltonien hyperfin magnétique . . . . .	1239
B <sub>XII</sub> . Calcul des valeurs moyennes de l'hamiltonien de structure fine dans les états $1s$ , $2s$ et $2p$ . . . . .	1248
C <sub>XII</sub> . Structure hyperfine et effet Zeeman du muonium et du positronium	1253
D <sub>XII</sub> . Influence du spin électronique sur l'effet Zeeman de la raie de résonance de l'hydrogène . . . . .	1261
E <sub>XII</sub> . Effet Stark de l'atome d'hydrogène . . . . .	1270

<b>Chapitre XIII Méthodes d'approximation pour les problèmes dépendant du temps . . . . .</b>	<b>1275</b>
A. <i>Position du problème . . . . .</i>	1277
B. <i>Résolution approchée de l'équation de Schrödinger . . . . .</i>	1278
C. <i>Cas particulier important : perturbation sinusoïdale ou constante . . . . .</i>	1283

### Compléments du Chapitre XIII.

GUIDE DE LECTURE . . . . .	1295
A <sub>XIII</sub> . <i>Interaction d'un atome avec une onde électromagnétique . . . . .</i>	1297
B <sub>XIII</sub> . <i>Réponses linéaire et non-linéaire d'un système à deux niveaux soumis à une perturbation sinusoïdale . . . . .</i>	1315
C <sub>XIII</sub> . <i>Oscillations d'un système entre deux états discrets sous l'effet d'une perturbation sinusoïdale résonnante . . . . .</i>	1332
D <sub>XIII</sub> . <i>Désintégration d'un état discret couplé de manière résonnante à un continuum d'états finals . . . . .</i>	1336
E <sub>XIII</sub> . <i>Exercices . . . . .</i>	1349

### Chapitre XIV Systèmes de particules identiques . . . . . 1361

A. <i>Position du problème . . . . .</i>	1363
B. <i>Opérateurs de permutation . . . . .</i>	1369
C. <i>Le postulat de symétrisation . . . . .</i>	1378
D. <i>Discussion physique . . . . .</i>	1388

**Compléments du Chapitre XIV.**

GUIDE DE LECTURE . . . . .	1401
A <sub>XIV</sub> . <i>Atomes à plusieurs électrons. Configurations électroniques . .</i>	1402
B <sub>XIV</sub> . <i>Niveaux d'énergie de l'atome d'hélium : configurations, termes, multiplets . . . . .</i>	1410
C <sub>XIV</sub> . <i>Propriétés physiques d'un gaz d'électrons. Application aux solides</i>	1424
D <sub>XIV</sub> . <i>Exercices . . . . .</i>	1440
<b>Appendice I Séries de Fourier et transformation de Fourier . .</b>	<b>1449</b>
<b>Appendice II La « fonction » <math>\delta</math> de Dirac . . . . .</b>	<b>1459</b>
<b>Appendice III Lagrangien et Hamiltonien en mécanique classique</b>	<b>1473</b>
BIBLIOGRAPHIE . . . . .	1491
INDEX. . . . .	1509