

## Tome II

<b>VIII THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES COLLISIONS</b>	<b>931</b>
A Introduction . . . . .	931
B Etats stationnaires de diffusion. Calcul de la section efficace . . . . .	936
C Diffusion par un potentiel central. Méthode des déphasages . . . . .	949
<b>GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS</b>	<b>965</b>
<b>A<sub>VIII</sub> La particule libre : états stationnaires de moment cinétique bien défini</b>	<b>967</b>
1 Equation radiale . . . . .	967
2 Les ondes sphériques libres . . . . .	969
3 Relation entre les ondes sphériques libres et les ondes planes . . . . .	976
<b>B<sub>VIII</sub> Description phénoménologique des collisions avec absorption</b>	<b>979</b>
1 Principe de la méthode . . . . .	979
2 Calcul des sections efficaces . . . . .	980
<b>C<sub>VIII</sub> Exemples simples d'application de la théorie de la diffusion</b>	<b>985</b>
1 Approximation de Born pour un potentiel de Yukawa . . . . .	985
2 Diffusion par une sphère dure à basse énergie . . . . .	988
3 Exercices . . . . .	989
*****	
<b>IX LE SPIN DE L'ÉLECTRON</b>	<b>993</b>
A Introduction du spin de l'électron . . . . .	994
B Propriétés particulières d'un moment cinétique $1/2$ . . . . .	998
C Description non relativiste d'une particule de spin $1/2$ . . . . .	1000
<b>GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS</b>	<b>1007</b>
<b>A<sub>IX</sub> Opérateurs de rotation pour une particule de spin <math>1/2</math></b>	<b>1009</b>
1 Opérateurs de rotation dans l'espace des états . . . . .	1009
2 Rotation des états de spin . . . . .	1010
3 Rotation des spineurs à deux composantes . . . . .	1013
<b>B<sub>IX</sub> Exercices</b>	<b>1017</b>
*****	
<b>X COMPOSITION DES MOMENTS CINÉTIQUES</b>	<b>1023</b>
A Introduction . . . . .	1023
B Composition de deux spins $1/2$ . Méthode élémentaire . . . . .	1027
C Composition de deux moments cinétiques quelconques. Méthode générale . . . . .	1033
<b>GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS</b>	<b>1049</b>

<b>A<sub>X</sub></b>	<b>Exemples de composition de moments cinétiques</b>	<b>1051</b>
1	Composition de $\mathbf{j}_1 = 1$ et $\mathbf{j}_2 = 1$ . . . . .	1051
2	Composition d'un moment cinétique orbital $l$ entier et d'un spin $1/2$ . . . . .	1054
<b>B<sub>X</sub></b>	<b>Coefficients de Clebsch-Gordan</b>	<b>1059</b>
1	Propriétés générales des coefficients de Clebsch-Gordan . . . . .	1060
2	Conventions de phase. Réalité des coefficients de Clebsch-Gordan . . . . .	1062
3	Quelques relations utiles . . . . .	1064
<b>C<sub>X</sub></b>	<b>Composition des harmoniques sphériques</b>	<b>1067</b>
1	Fonctions $\Phi_J^M(\Omega_1; \Omega_2)$ . . . . .	1067
2	Fonctions $F_l^m(\Omega)$ . . . . .	1068
3	Décomposition d'un produit d'harmoniques sphériques; intégrale d'un produit de trois harmoniques sphériques . . . . .	1070
<b>D<sub>X</sub></b>	<b>Opérateurs vectoriels : Théorème de Wigner-Eckart</b>	<b>1073</b>
1	Définition des opérateurs vectoriels; exemples . . . . .	1074
2	Théorème de Wigner-Eckart pour les opérateurs vectoriels . . . . .	1075
3	Application : calcul du facteur de Landé $g_J$ d'un niveau atomique . . . . .	1080
<b>E<sub>X</sub></b>	<b>Moments multipolaires électriques</b>	<b>1085</b>
1	Définition des moments multipolaires . . . . .	1085
2	Éléments de matrice des opérateurs multipolaires électriques . . . . .	1093
<b>F<sub>X</sub></b>	<b>Deux moments cinétiques <math>\mathbf{J}_1</math> et <math>\mathbf{J}_2</math> couplés par une interaction</b>	<b>1099</b>
	$a\mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{J}_2$	
1	Rappels classiques . . . . .	1100
2	Equations d'évolution des valeurs moyennes quantiques $\langle \mathbf{J}_1 \rangle$ et $\langle \mathbf{J}_2 \rangle$ . . . . .	1102
3	Cas particulier de deux spins $1/2$ . . . . .	1103
4	Etude d'un modèle simple de collision entre deux spins $1/2$ . . . . .	1108
<b>G<sub>X</sub></b>	<b>Exercices</b>	<b>1113</b>
*****		
<b>XI</b>	<b>THÉORIE DES PERTURBATIONS STATIONNAIRES</b>	<b>1121</b>
A	Exposé de la méthode . . . . .	1122
B	Perturbation d'un niveau non dégénéré . . . . .	1126
C	Perturbation d'un niveau dégénéré . . . . .	1130
<b>GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS</b>		<b>1135</b>
<b>A<sub>XI</sub></b>	<b>Oscillateur harmonique à une dimension soumis à un potentiel perturbateur en <math>x, x^2, x^3</math></b>	<b>1137</b>
1	Perturbation par un potentiel linéaire . . . . .	1137
2	Perturbation par un potentiel quadratique . . . . .	1139
3	Perturbation par un potentiel en $x^3$ . . . . .	1140

<b>B<sub>XI</sub></b>	<b>Interaction entre les dipôles magnétiques de deux particules de spin 1/2</b>	<b>1147</b>
1	Hamiltonien d'interaction $W$ . . . . .	1147
2	Effets de l'interaction dipôle-dipôle sur les sous-niveaux Zeeman des deux particules supposées fixes . . . . .	1150
3	Effets de l'interaction dans un état lié . . . . .	1155
<b>C<sub>XI</sub></b>	<b>Forces de Van der Waals</b>	<b>1157</b>
1	Hamiltonien d'interaction électrostatique entre deux atomes d'hydrogène	1158
2	Forces de Van der Waals entre deux atomes d'hydrogène dans l'état fondamental $1s$ . . . . .	1160
3	Forces de Van der Waals entre un atome d'hydrogène dans l'état $1s$ et un atome d'hydrogène dans l'état $2p$ . . . . .	1164
4	Interaction d'un atome d'hydrogène dans l'état fondamental avec une paroi conductrice . . . . .	1166
<b>D<sub>XI</sub></b>	<b>Effet de volume : influence de l'extension spatiale du noyau sur les niveaux atomiques</b>	<b>1169</b>
1	Correction énergétique au premier ordre . . . . .	1170
2	Application à quelques systèmes hydrogénéoïdes . . . . .	1173
<b>E<sub>XI</sub></b>	<b>La méthode des variations</b>	<b>1177</b>
1	Principe de la méthode . . . . .	1177
2	Application à un exemple simple . . . . .	1180
3	Discussion . . . . .	1183
<b>F<sub>XI</sub></b>	<b>Bandes d'énergie des électrons dans les solides : modèle simple</b>	<b>1185</b>
1	Première approche du problème : discussion qualitative . . . . .	1186
2	Etude plus précise sur un modèle simple . . . . .	1190
<b>G<sub>XI</sub></b>	<b>Exemple simple de liaison chimique : l'ion <math>H_2^+</math></b>	<b>1199</b>
1	Introduction . . . . .	1199
2	Calcul variationnel des énergies . . . . .	1202
3	Critique du modèle précédent. Améliorations possibles . . . . .	1211
4	Autres orbitales moléculaires de l'ion $H_2^+$ . . . . .	1214
5	Origine de la liaison chimique ; théorème du viriel . . . . .	1219
<b>H<sub>XI</sub></b>	<b>Exercices</b>	<b>1231</b>

\*\*\*\*\*

<b>XII</b>	<b>APPLICATION DE LA THÉORIE DES PERTURBATIONS : STRUCTURE FINE ET HYPERFINE DE L'ATOME D'HYDROGÈNE</b>	<b>1241</b>
A	Introduction . . . . .	1241
B	Termes supplémentaires dans l'hamiltonien . . . . .	1243
C	Structure fine du niveau $n = 2$ . . . . .	1249
D	Structure hyperfine du niveau $n = 1$ . . . . .	1256

E	Effet Zeeman de structure hyperfine du niveau fondamental $1s$ . . . . .	1262
<b>GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS</b>		<b>1277</b>
<b>A<sub>XII</sub></b>	<b>Hamiltonien hyperfin magnétique</b>	<b>1279</b>
1	Interaction de l'électron avec les potentiels scalaire et vecteur créés par le proton . . . . .	1279
2	Forme détaillée de l'hamiltonien hyperfin . . . . .	1280
3	Conclusion : hamiltonien de structure hyperfine . . . . .	1285
<b>B<sub>XII</sub></b>	<b>Calcul des valeurs moyennes de l'hamiltonien de structure fine dans les états <math>1s</math>, <math>2s</math> et <math>2p</math></b>	<b>1289</b>
1	Calcul de $\langle 1/R \rangle$ , $\langle 1/R^2 \rangle$ et $\langle 1/R^3 \rangle$ . . . . .	1289
2	Valeurs moyennes $\langle W_{mv} \rangle$ . . . . .	1291
3	Valeurs moyennes $\langle W_D \rangle$ . . . . .	1292
4	Calcul du coefficient $\xi_{2p}$ associé à $W_{SO}$ dans le niveau $2p$ . . . . .	1292
<b>C<sub>XII</sub></b>	<b>Structure hyperfine et effet Zeeman du muonium et du positronium</b>	<b>1293</b>
1	Structure hyperfine du niveau fondamental $1s$ . . . . .	1293
2	Effet Zeeman du niveau fondamental $1s$ . . . . .	1294
<b>D<sub>XII</sub></b>	<b>Influence du spin électronique sur l'effet Zeeman de la raie de résonance de l'hydrogène</b>	<b>1301</b>
1	Introduction . . . . .	1301
2	Diagrammes Zeeman des niveaux $1s$ et $2s$ . . . . .	1302
3	Diagramme Zeeman du niveau $2p$ . . . . .	1302
4	Effet Zeeman de la raie de résonance . . . . .	1305
<b>E<sub>XII</sub></b>	<b>Effet Stark de l'atome d'hydrogène</b>	<b>1311</b>
1	Effet Stark du niveau $n = 1$ . . . . .	1311
2	Effet Stark du niveau $n = 2$ . . . . .	1312
*****		
<b>XIII</b>	<b>MÉTHODES D'APPROXIMATION POUR LES PROBLÈMES DÉPENDANT DU TEMPS</b>	<b>1315</b>
A	Position du problème . . . . .	1316
B	Résolution approchée de l'équation de Schrödinger . . . . .	1317
C	Cas particulier important : perturbation sinusoïdale ou constante . . . . .	1321
D	Perturbation aléatoire . . . . .	1332
E	Comportement aux temps longs pour un atome à deux niveaux . . . . .	1336
<b>GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS</b>		<b>1349</b>
<b>A<sub>XIII</sub></b>	<b>Interaction d'un atome avec une onde électromagnétique</b>	<b>1351</b>
1	Hamiltonien d'interaction. Règles de sélection . . . . .	1352
2	Excitation non résonnante. Comparaison avec le modèle de l'électron élastiquement lié . . . . .	1362
3	Excitation résonnante. Absorption et émission induite . . . . .	1365

<b>B<sub>XIII</sub></b>	<b>Réponses linéaire et non linéaire d'un système à deux niveaux soumis a une perturbation sinusoïdale</b>	<b>1369</b>
1	Description du modèle . . . . .	1370
2	Résolution approchée des équations de Bloch du système . . . . .	1373
3	Discussion physique . . . . .	1376
4	Exercices d'application de ce complément . . . . .	1385
<b>C<sub>XIII</sub></b>	<b>Oscillations d'un système entre deux états discrets sous l'effet d'une perturbation sinusoïdale résonnante</b>	<b>1387</b>
1	Principe de la méthode : approximation séculaire . . . . .	1387
2	Résolution du système d'équations . . . . .	1388
3	Discussion physique . . . . .	1389
<b>D<sub>XIII</sub></b>	<b>Désintégration d'un état discret couplé à un continuum d'états finals</b>	<b>1391</b>
1	Position du problème . . . . .	1391
2	Description du modèle considéré . . . . .	1392
3	Approximation des temps courts. Lien avec la théorie des perturbations au premier ordre . . . . .	1396
4	Une autre méthode de résolution approchée de l'équation de Schrödinger	1398
5	Discussion physique . . . . .	1399
<b>E<sub>XIII</sub></b>	<b>Perturbation aléatoire dépendant du temps, relaxation</b>	<b>1405</b>
1	Evolution de l'opérateur densité . . . . .	1406
2	Relaxation d'un ensemble de spins 1/2 . . . . .	1414
3	Conclusion . . . . .	1424
<b>F<sub>XIII</sub></b>	<b>Exercices</b>	<b>1425</b>
*****		
<b>XIV</b>	<b>SYSTÈMES DE PARTICULES IDENTIQUES</b>	<b>1435</b>
A	Position du problème . . . . .	1436
B	Opérateurs de permutation . . . . .	1442
C	Le postulat de symétrisation . . . . .	1451
D	Discussion physique . . . . .	1460
<b>GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS</b>		<b>1473</b>
<b>A<sub>XIV</sub></b>	<b>Atomes à plusieurs électrons. Configurations électroniques</b>	<b>1475</b>
1	L'approximation du champ central . . . . .	1475
2	Configurations électroniques des divers éléments . . . . .	1479
<b>B<sub>XIV</sub></b>	<b>Niveaux d'énergie de l'atome d'Hélium : configurations, termes, multiplets</b>	<b>1483</b>
1	Approximation du champ central. Configurations . . . . .	1483
2	Effet de la répulsion électrostatique entre électrons : énergie d'échange, termes spectraux . . . . .	1486
3	Niveaux de structure fine; multiplets . . . . .	1494

<b>C<sub>XIV</sub></b>	<b>Propriétés physiques d'un gaz d'électrons. Application aux solides</b>	<b>1499</b>
1	Electrons libres enfermés dans une "boîte" . . . . .	1499
2	Electrons dans les solides . . . . .	1509
<b>D<sub>XIV</sub></b>	<b>Exercices</b>	<b>1515</b>
*****		
	<b>APPENDICES</b>	<b>1525</b>
<b>I</b>	<b>Séries de Fourier et transformation de Fourier</b>	<b>1525</b>
1	Séries de Fourier . . . . .	1525
2	Transformation de Fourier . . . . .	1528
<b>II</b>	<b>La "fonction" <math>\delta</math> de Dirac</b>	<b>1535</b>
1	Introduction; principales propriétés . . . . .	1535
2	La "fonction" $\delta$ et la transformation de Fourier . . . . .	1540
3	Primitive et dérivées de la "fonction" $\delta$ . . . . .	1541
4	La "fonction" $\delta$ dans l'espace à trois dimensions . . . . .	1544
<b>III</b>	<b>Lagrangien et Hamiltonien en mécanique classique</b>	<b>1547</b>
1	Rappel des lois de Newton . . . . .	1547
2	Fonction de Lagrange et équations de Lagrange . . . . .	1550
3	Fonction de Hamilton et équations canoniques . . . . .	1551
4	Exemples d'application du formalisme hamiltonien . . . . .	1553
5	Principe de moindre action . . . . .	1559
	<b>BIBLIOGRAPHIE DES TOMES I ET II</b>	<b>1565</b>
	<b>INDEX</b>	<b>1587</b>