

Table des matières

Préface	1
Louis MARCHILDON	
Avant-propos	3
Chapitre 1. Le rayonnement thermique	7
1.1. Notion de rayonnement	8
1.1.1. Définition du rayonnement	8
1.1.2. Origine du rayonnement	8
1.1.3. Classification des corps	10
1.2. Flux énergétique	10
1.2.1. Définition du flux énergétique, coefficient d'absorption	10
1.2.2. Corps noir et corps gris	11
1.3. Spectre d'émission du corps noir	12
1.3.1. Isothermes du corps noir : faits expérimentaux	12
1.3.2. Angle solide	13
1.3.3. Loi de Lambert, luminance	15
1.3.4. Lois de Kirchhoff	16
1.3.5. Loi de Stefan-Boltzmann, émittance énergétique totale	16
1.3.6. Lois de Wien, spectre utile	18
1.3.6.1. Première loi de Wien	18
1.3.6.2. Deuxième loi de Wien	19
1.3.7. Loi de Rayleigh-Jeans, « catastrophe ultraviolette »	20
1.3.8. Loi de Planck, émittance énergétique monochromatique	21

1.4. Exercices	23
1.4.1. Exercice 1 – Calcul de la constante de Stefan-Boltzmann	23
1.4.2. Exercice 2 – Calcul de la température de surface du Soleil	24
1.4.3. Exercice 3 – Énergie moyenne d'un oscillateur quantique, formule de Planck	24
1.4.4. Exercice 4 – Déduction de la première loi de Wien à partir de la formule de Planck	25
1.4.5. Exercice 5 – Énergie électromagnétique totale rayonnée par le corps noir	26
1.5. Solutions des exercices	27
1.5.1. Solution 1 – Calcul de la constante de Stefan-Boltzmann	27
1.5.2. Solution 2 – Calcul de la température de surface du Soleil	28
1.5.3. Solution 3 – Énergie moyenne d'un oscillateur quantique, formule de Planck	30
1.5.4. Solution 4 – Déduction de la première loi de Wien à partir de la formule de Planck	33
1.5.5. Solution 5 – Énergie électromagnétique totale rayonnée par le corps noir	35

Chapitre 2. Aspects ondulatoire et corpusculaire de la lumière 37

2.1. Interférences lumineuses	38
2.1.1. Élongation d'une onde lumineuse	38
2.1.2. Élongation totale de sources lumineuses synchrones	39
2.1.3. Dispositif de Young	40
2.1.4. Champ interférentiel, franges d'interférences	41
2.1.5. Interprétation, terme d'interférence	41
2.1.6. Différence de marche	44
2.1.7. Interfrange, ordre d'interférence	45
2.2. Effet photoélectrique	48
2.2.1. Mise en évidence expérimentale, définition	48
2.2.2. Interprétation, énergie du photon	49
2.2.3. Relation d'Einstein, énergie d'extraction	49
2.2.4. Seuil photoélectrique	50
2.2.5. Potentiel d'arrêt, courant de saturation	52
2.2.6. Rendement quantique d'une cellule photoélectrique	55
2.2.7. Sensibilité d'une cellule photoélectrique	56
2.3. Effet Compton	57
2.3.1. Mise en évidence expérimentale, définition	57
2.3.2. Énergie et impulsion d'une particule relativiste	59
2.3.3. Interprétation, impulsion du photon, déplacement de Compton	60

2.4. Conciliation des aspects corpusculaire et ondulatoire de la lumière. . .	63
2.4.1. Propriétés corpusculaires et ondulatoires du photon	63
2.4.2. Relation de Planck-Einstein	64
2.5. Exercices	65
2.5.1. Exercice 1 – Diffraction par une fente, interférences	65
2.5.2. Exercice 2 – Ordre de franges d’interférences	66
2.5.3. Exercice 3 – Mesure expérimentale de la constante de Planck et du travail d’extraction d’une photocathode émissive	67
2.5.4. Exercice 4 – Étude expérimentale du comportement d’une cellule photoélectrique, rendement quantique et sensibilité	68
2.5.5. Exercice 5 – Diffusion arrière de Compton	68
2.5.6. Exercice 6 – Énergie et impulsion des photons diffusés et de l’électron éjecté par effet Compton	69
2.5.7. Exercice 7 – Effet Compton inverse	69
2.6. Solutions des exercices	70
2.6.1. Solution 1 – Diffraction par une fente, interférences	70
2.6.2. Solution 2 – Ordre de franges d’interférences	71
2.6.3. Solution 3 – Mesure expérimentale de la constante de Planck et du travail d’extraction d’une photocathode émissive	73
2.6.4. Solution 4 – Étude expérimentale du comportement d’une cellule photoélectrique, rendement quantique et sensibilité	77
2.6.5. Solution 5 – Diffusion arrière de Compton	79
2.6.6. Solution 6 – Énergie et impulsion des photons diffusés et de l’électron éjecté par effet Compton	81
2.6.7. Solution 7 – Effet Compton inverse	82

Chapitre 3. Les nombres quantiques de l’électron 87

3.1. Faits expérimentaux	89
3.1.1. Le spectroscope	89
3.1.2. Premières raies de l’atome d’hydrogène identifiées par Ångström	92
3.1.3. Formule empirique de Balmer	93
3.1.4. Introduction de la constante de Rydberg pour l’hydrogène	94
3.1.5. Principe de combinaison de Ritz	95
3.2. Modèle planétaire de l’atome de Rutherford	96
3.2.1. Diffusion de Rutherford, naissance du noyau atomique	96
3.2.2. Inconvénients du modèle planétaire	98
3.3. Modèle de l’atome quantifié de Bohr	99
3.3.1. Modèle en couche des configurations électroniques	99
3.3.2. Postulats de Bohr, nombre quantique principal	99

3.3.3. Spectre d'absorption, spectre d'émission	102
3.3.4. Principe de quantification du moment cinétique	103
3.3.5. Expression quantifiée de l'énergie de l'atome d'hydrogène	104
3.3.6. Interprétation des séries spectrales	109
3.3.6.1. Série de Balmer (1885) : $p = 2$	110
3.3.6.2. Série de Lyman (1906) : $p = 1$	110
3.3.6.3. Série de Paschen (1908) : $p = 3$	111
3.3.6.4. Série de Brackett (1922) : $p = 4$	111
3.3.6.5. Série de Pfund (1924) : $p = 5$	111
3.3.7. Diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène, énergie d'ionisation	111
3.3.8. Avantages et insuffisances du modèle de Bohr	113
3.3.9. Constante réduite de Rydberg	114
3.4. Modèle atomique de Sommerfeld	116
3.4.1. Faits expérimentaux : effet Zeeman normal	116
3.4.2. Modèle de Bohr-Sommerfeld, nombre quantique orbital	118
3.4.3. Notion d'orbitale atomique, configuration électronique	119
3.4.4. Interprétation de l'effet Zeeman normal, nombre quantique magnétique orbital	122
3.4.5. Avantages et insuffisances du modèle de Bohr-Sommerfeld	124
3.5. Le spin de l'électron	125
3.5.1. Expérience de Stern et Gerlach	125
3.5.2. Hypothèse d'Uhlenbeck et Goudsmit, spin de l'électron	126
3.5.3. Degré de dégénérescence des niveaux d'énergie	128
3.5.4. Nombre quantique total, règles de sélection	129
3.6. Moments magnétiques de l'électron	131
3.6.1. Moments magnétiques orbital et de spin	131
3.6.2. Énergie potentielle d'interaction magnétique	134
3.6.3. Interaction spin-orbite, notation spectroscopique des états	135
3.6.4. Structure fine des niveaux d'énergies de l'atome d'hydrogène	137
3.7. Exercices	139
3.7.1. Exercice 1 – Spectre d'ions hydrogénoïdes	140
3.7.2. Exercice 2 – Exploitation du diagramme d'énergie de l'atome de lithium	141
3.7.3. Exercice 3 – Spectres de l'atome d'hydrogène, application en astrophysique	142
3.7.4. Exercice 4 – Phénomène de résonance atomique	143
3.7.5. Exercice 5 – Spectre des rayons X	145
3.7.6. Exercice 6 – Durée de vie de l'atome d'hydrogène du modèle planétaire	148

3.7.7. Exercice 7 – Principe de correspondance, principe de quantification du moment cinétique	149
3.7.8. Exercice 8 – Confirmation expérimentale du modèle atomique de Bohr : expérience de Franck et Hertz	150
3.7.9. Exercice 9 – Identification d'un système hydrogénoïde	152
3.7.10. Exercice 10 – Effet d'entraînement du noyau : découverte du deuton	153
3.7.11. Exercice 11 – Effet Zeeman normal sur la raie Lyman alpha de l'atome d'hydrogène	154
3.7.12. Exercice 12 – Triplet de Zeeman-Lorentz, précession de Larmor	155
3.7.13. Exercice 13 – Interprétation théorique de l'expérience de Stern et Gerlach, force magnétique	156
3.7.14. Exercice 14 – Intensités des taches dans l'expérience de Stern et Gerlach	158
3.7.15. Exercice 15 – Effet Zeeman normal sur le niveau 2p des systèmes hydrogénoïdes	159
3.7.16. Exercice 16 – Effet Zeeman anormal sur le niveau fondamental des systèmes hydrogénoïdes	160
3.7.17. Exercice 17 – Effet Zeeman anormal sur le niveau 2p des systèmes hydrogénoïdes	160
3.7.18. Exercice 18 – Structure fine de la raie de résonance de l'atome d'hydrogène	161
3.7.19. Exercice 19 – Structure fine du niveau $n = 2$ de l'atome d'hydrogène	161
3.7.20. Exercice 20 – Illustration de l'effet Zeeman complexe sur la raie jaune du sodium, règles de sélection	163
3.7.21. Exercice 21 – Oscillateur linéaire dans l'espace des phases, principe de quantification de Bohr du moment cinétique	163
3.8. Solutions des exercices	165
3.8.1. Solution 1 – Spectre d'ions hydrogénoïdes	165
3.8.2. Solution 2 – Exploitation du diagramme d'énergie de l'atome de lithium	168
3.8.3. Solution 3 – Spectres de l'atome d'hydrogène, application en astrophysique	170
3.8.4. Solution 4 – Phénomène de résonance atomique	172
3.8.5. Solution 5 – Spectre des rayons X	174
3.8.6. Solution 6 – Durée de vie de l'atome d'hydrogène du modèle planétaire	176
3.8.7. Solution 7 – Principe de correspondance, principe de quantification du moment cinétique	179

3.8.8. Solution 8 – Confirmation expérimentale du modèle atomique de Bohr : expérience de Franck et Hertz	183
3.8.9. Solution 9 – Identification d'un système hydrogénoïde	188
3.8.10. Solution 10 – Effet d'entraînement du noyau : découverte du deuton	190
3.8.11. Solution 11 – Effet Zeeman normal sur la raie Lyman alpha de l'atome d'hydrogène	192
3.8.12. Solution 12 – Triplet de Zeeman-Lorentz, précession de Larmor	193
3.8.13. Solution 13 – Interprétation théorique de l'expérience de Stern et Gerlach, force magnétique	198
3.8.14. Solution 14 – Intensités des taches dans l'expérience de Stern et Gerlach	201
3.8.15. Solution 15 – Effet Zeeman normal sur le niveau 2p des systèmes hydrogénoïdes	206
3.8.16. Solution 16 – Effet Zeeman anormal sur le niveau fondamental des systèmes hydrogénoïdes	207
3.8.17. Solution 17 – Effet Zeeman anormal sur le niveau 2p des systèmes hydrogénoïdes	208
3.8.18. Solution 18 – Structure fine de la raie de résonance de l'atome d'hydrogène	210
3.8.19. Solution 19 – Structure fine du niveau $n = 2$ de l'atome d'hydrogène	212
3.8.20. Solution 20 – Illustration de l'effet Zeeman complexe sur la raie jaune du sodium, règles de sélection	214
3.8.21. Solution 21 – Oscillateur linéaire dans l'espace des phases, principe de quantification de Bohr du moment cinétique	215
Chapitre 4. Ondes de matière – Relations d'incertitudes	221
4.1. Ondes de matière de de Broglie	222
4.1.1. De l'onde lumineuse à l'onde de matière	222
4.1.2. Relation de de Broglie	223
4.1.3. Loi de dispersion des ondes de matière	225
4.1.4. Vitesse de phase et vitesse de groupe	226
4.1.5. Principe de quantification de Bohr et hypothèse de de Broglie	230
4.1.6. Confirmation expérimentale, expérience de Davisson et Germer	232
4.2. Relations d'incertitudes de Heisenberg	241
4.2.1. Principe d'incertitude	241
4.2.2. Interprétation probabiliste de la fonction d'onde	242
4.2.3. Écart quadratique moyen	243

4.2.4. Relations d'incertitude spatiales, variables complémentaires . . .	244
4.2.5. Relation d'incertitude temps-énergie, largeur des raies.	246
4.2.6. Microscope de Heisenberg	247
4.3. Exercices	249
4.3.1. Exercice 1 – Vitesse de groupe des ondes de de Broglie dans le cas relativiste.	250
4.3.2. Exercice 2 – Observer un atome à l'aide d'un microscope électronique	250
4.4. Solutions des exercices	252
4.4.1. Solution 1 – Vitesse de groupe des ondes de de Broglie dans le cas relativiste.	252
4.4.2. Solution 2 – Observer un atome à l'aide d'un microscope électronique	253
Annexe 1. Loi de Planck	255
Annexe 2. Loi de Planck et théorie d'Einstein	269
Annexe 3. Loi de Stefan-Boltzmann	277
Annexe 4. Théorie relativiste de Dirac	289
Annexe 5. Structures fine et hyperfine, largeur naturelle	295
Bibliographie	311
Index	315
Sommaire de <i>Introduction à la mécanique quantique 2</i>.	327