

Romain
Maciejko

Introduction à l'optique quantique

$$\begin{aligned} |0\rangle &= \langle Q|0\rangle \equiv a \left(\frac{1}{\hbar\pi} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega}} e^{-Q^2/2\hbar} \\ &= \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega}} \left(\frac{1}{\hbar\pi} \right)^{1/4} e^{-Q^2/2\hbar} \\ &= \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2}} \left(\frac{1}{\hbar\pi} \right)^{1/4} e^{-Q^2/2\hbar} \end{aligned}$$

PRESSES INTERNATIONALES
POLYTECHNIQUE

Table des matières

Avant-propos	v
Chapitre 1 Du rayonnement classique aux photons	1
1.1 Introduction.....	1
1.1.1 Formule de Larmor	2
1.1.2 Oscillateur	4
1.2 Problème du corps noir	5
1.2.1 Introduction.....	5
1.2.2 Modèle d'un gaz non polaire dilué.....	5
1.2.3 Formule du rayonnement classique.....	15
1.2.4 Formule de Rayleigh-Jeans	21
1.2.5 Pression de radiation	23
1.3 Planck et les quanta	25
1.3.1 Loi de Stefan.....	26
1.3.2 Formule de Wien	28
1.3.3 Distribution de Planck.....	29
1.3.4 Planck et la quantification	33
1.3.5 Applications de la formule de Planck.....	36
1.4 Effet photoélectrique.....	38
1.5 Conclusion	42
Chapitre 2 Mécanique quantique et rayonnement	45
2.1 Introduction.....	45
2.2 Théorie de Bohr.....	46
2.2.1 Introduction.....	46
2.2.2 Quantification de Bohr-Sommerfeld	47
2.2.3 Méthode heuristique	48

2.3	Formulation canonique.....	48
2.3.1	Introduction.....	48
2.3.2	Formules de Ladenburg et Kramers.....	50
2.3.3	Approche de Ladenburg.....	51
2.3.4	Coefficients d'Einstein.....	52
2.3.5	Règle de Kuhn-Thomas.....	58
2.3.6	Approche de Heisenberg.....	60
2.3.7	Mécanique quantique des matrices.....	64
2.3.8	Oscillateur harmonique quantifié.....	66
2.3.9	Relation de commutation.....	69
2.4	Relation d'incertitude.....	71
2.5	Probabilité de transition.....	74
2.5.1	Formulation générale.....	74
2.5.2	Perturbation constante.....	78
2.5.3	Perturbation sinusoïdale quasi résonnante.....	80
2.6	Calcul des coefficients d'Einstein.....	82
2.6.1	Hamiltonien d'interaction.....	82
2.6.2	Élément de matrice.....	85
2.7	Conclusion.....	88
 Chapitre 3 Champ électromagnétique.....		91
3.1	Introduction.....	91
3.2	Théorie de Maxwell.....	91
3.2.1	Équations.....	91
3.2.2	Modes.....	93
3.2.3	Formes de modes.....	94
3.3	Cas monomode.....	95
3.3.1	Quantification.....	97
3.3.2	Équations d'évolution.....	99
3.3.3	Oscillateur harmonique quantifié.....	99
3.3.4	Normalisation des états nombre.....	100
3.3.5	Propriétés.....	101
3.4	Cas multimode.....	102
3.4.1	Introduction.....	102
3.4.2	Champ de rayonnement.....	104
3.4.3	Variables canoniques.....	105
3.4.4	Densité de modes.....	107
3.5	Fluctuations.....	108
3.5.1	Généralités.....	108

3.5.2	Opérateur nombre.....	108
3.5.3	Champ électromagnétique.....	109
3.5.4	Opérateurs amplitude et phase.....	112
3.5.5	Représentation des fluctuations.....	113
3.6	Conclusion.....	121
Chapitre 4 États cohérents.....		123
4.1	Introduction.....	123
4.2	Lien avec les états nombre à un seul mode.....	124
4.3	Distribution de Poisson.....	126
4.4	Opérateur de Glauber.....	127
4.4.1	Introduction.....	127
4.4.2	Formule de Campbell-Baker-Hausdorff.....	127
4.4.3	Effet sur les opérateurs.....	129
4.4.4	Effet sur les états.....	131
4.5	Propriétés des états cohérents.....	132
4.5.1	Orthogonalité.....	132
4.5.2	Normalisation.....	132
4.5.3	Fermeture.....	132
4.5.4	Fonctions d'opérateurs $\hat{a}^*$ et $\hat{a}$	134
4.5.5	Évolution temporelle.....	134
4.5.6	Relation d'incertitude minimale.....	136
4.6	Champ électrique.....	137
4.6.1	Amplitude.....	137
4.6.2	Opérateurs de quadrature du champ.....	141
4.7	Conclusion.....	143
Chapitre 5 États comprimés.....		145
5.1	Introduction.....	145
5.1.1	Différents cas.....	146
5.1.2	Compression en quadrature.....	147
5.2	Définitions des états comprimés.....	148
5.3	Moyennes et variances.....	152
5.3.1	Moyennes.....	152
5.3.2	Variances.....	154
5.3.3	Compression en nombre de photons.....	155
5.3.4	Vide comprimé.....	156
5.4	Champ électrique.....	158

5.5	Éléments d'optique non linéaire	159
5.5.1	Introduction.....	159
5.5.2	Processus non linéaires.....	161
5.5.3	Indice non linéaire.....	163
5.5.4	Interactions non linéaires.....	165
5.5.5	Équations des champs	170
5.6	Génération.....	174
5.6.1	Effet Kerr.....	174
5.6.2	Conversion paramétrique	177
5.6.3	États nombre	185
5.6.4	Amplitudes en quadrature.....	186
5.7	Détection	188
5.7.1	Lame séparatrice.....	188
5.7.2	Photocourant	191
5.7.3	Détection homodyne.....	191
5.8	Conclusion	194
 Chapitre 6 Tests et applications		197
6.1	Introduction.....	197
6.2	Polarisation du photon	198
6.2.1	Cas classique	198
6.2.2	Cas quantique	199
6.2.3	Opérateurs de Stokes.....	201
6.3	États intriqués	203
6.3.1	Notions préliminaires	203
6.3.2	Production par conversion paramétrique	206
6.4	Paradoxe EPR	208
6.4.1	Introduction.....	208
6.4.2	Inégalité de Bell	210
6.5	Théorème de non-clonage	214
6.6	Téléportation quantique	216
6.6.1	Approche théorique	216
6.6.2	Aspect expérimental	218
6.7	Cryptographie quantique	220
6.8	Non-démolition quantique.....	222
6.8.1	Introduction.....	222
6.8.2	Mesure QND par l'effet Kerr	224
6.9	Conclusion	230

Chapitre 7 Représentations quantiques	233
7.1 Introduction	233
7.2 Fonctions d'onde	234
7.2.1 Vide	235
7.2.2 États nombre	237
7.2.3 Variables Q et P	238
7.2.4 État cohérent	240
7.2.5 État comprimé	243
7.3 Fonction de Wigner	245
7.3.1 Introduction	245
7.3.2 Distributions marginales	246
7.3.3 Propriétés	248
7.3.4 Exemples	251
7.4 Autres pseudodistributions	261
7.4.1 Introduction	261
7.4.2 Aperçu	261
7.5 Conclusion	263
 Chapitre 8 Électrodynamique quantique	265
8.1 Introduction	265
8.2 Unités et conventions	266
8.3 Élément de matrice S	267
8.4 Champ scalaire	272
8.5 Champ de Dirac	275
8.6 Champ de Maxwell	276
8.7 Diagramme de Feynman	276
8.7.1 Série de Born	276
8.7.2 Diffusion de Rutherford	278
8.7.3 Diffusion électron-proton	281
8.8 Conclusion	285
 Annexe A Énergie moyenne dans la distribution de Boltzmann	287
Annexe B Intensité optique	289
Annexe C Approche canonique	291
Annexe D Optique non linéaire	295
Annexe E Spin	301
Annexe F Démonstration de la formule 6.69	305
Annexe G Densité d'états	307
Annexe H Équations de champ	309

xii *Table des matières*

Annexe I	Expression du propagateur.....	313
Annexe J	Notions relativistes.....	319
Annexe K	Matrice densité.....	325
Bibliographie		329
Index.....		331