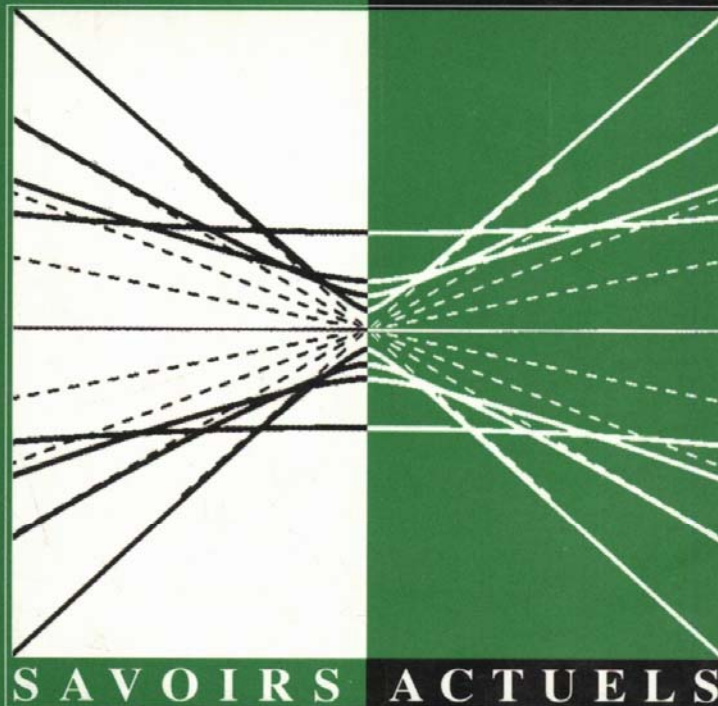


PHYSIQUE

Bernard CAGNAC - Jean-Pierre FAROUX

• LASERS •

Interaction lumière-atomes



SAVOIRS ACTUELS

 CNRS EDITIONS


EDP
SCIENCES

- ١٥٩ - ٥٤ - ١١

2-539-34-1

Bernard Cagnac
Jean-Pierre Faroux

LASERS

Interaction lumière-atomes



S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences / CNRS ÉDITIONS

Table des matières

Introduction	xiii
--------------	------

Partie I. Action d'un champ électromagnétique classique sur un système à deux états quantiques 1

1 Action d'une onde classique sur un atome isolé	3
1.1 Hamiltonien de l'interaction dipolaire électrique	3
1.2 Résolution de l'équation de Schrödinger. Représentation « tournante ». Approximation séculaire	6
1.3 Cas d'un seul atome non perturbé. Oscillation de Rabi pure . .	10
1.4 Les expériences de Rabi sur jet atomique	12
2 Équations différentielles de Bloch	17
2.1 Introduction des variables collectives, moyennées sur les atomes	18
2.2 Expression de l'équation de Schrödinger avec les nouvelles variables	20
2.3 Description théorique de l'émission spontanée et des collisions	22
2.4 Équations différentielles de Bloch	24
3 Solution stationnaire des équations de Bloch	27
3.1 Calcul de la solution stationnaire	27
3.2 Les populations atomiques. Comparaison avec le modèle des probabilités de transition	29
3.3 La polarisation atomique. Absorption et dispersion	33
3.4 Courbes de résonance en fréquence. Élargissement de puissance	36
3.5 Saturation	43
3.6 Comparaison avec l'oscillateur classique. Force d'oscillateur . .	46
4 Comparaison avec la résonance magnétique (spin 1/2)	49
4.1 Hamiltonien d'interaction avec un champ magnétique	50
4.1.1 Rapport gyromagnétique	50
4.1.2 Opérateur moment angulaire	50

4.2	Équation de Schrödinger dans un champ transverse oscillant . . .	51
4.3	Vecteur moment magnétique atomique	53
4.4	Vecteur de Bloch	54
4.4.1	Référentiel tournant	54
4.4.2	Cas d'un champ tournant. Approximation séculaire . . .	56
4.5	Aimantation volumique et relaxation	59
4.6	Solution stationnaire. Observation expérimentale	61
5	Solution transitoire des équations de Bloch	65
5.1	Calcul dans le cas résonnant. Amortissement de l'oscillation de Rabi	65
5.2	Calcul de l'oscillation amortie dans le cas général, non résonnant	69
5.3	Comparaison des oscillations atomiques individuelles avec l'oscillation collective	74
5.4	Observation expérimentale de l'oscillation collective	80
6	Impulsions courtes de l'onde électromagnétique	87
6.1	Impulsions carrées résonnantes à très forte intensité	88
6.2	Généralisation au cas d'impulsions résonnantes non carrées . . .	91
6.3	Impulsions carrées hors résonance. Élargissement de la résonance par réduction de la durée d'interaction	93
6.4	Évolution libre de la polarisation dans le noir	96
6.5	Cas de deux impulsions cohérentes successives (Ramsey). Explication approchée	98
6.6	Calcul exact des franges de Ramsey	102
6.6.1	Calcul de la population après la deuxième impulsion, en l'absence d'amortissement	102
6.6.2	Effet de l'amortissement	105
6.7	Application aux expériences de physique atomique et de métrologie	106
7	Champs électromagnétiques intenses	115
7.1	Le hamiltonien dans la Représentation « Tournante »	116
7.2	Cas non résonnant « déplacements lumineux » ou effet Stark dynamique	119
7.3	Observation expérimentale des déplacements lumineux	123
7.4	Cas résonnant doublet Autler-Townes	131
7.5	Oscillation de Rabi à résonance	136
7.6	Effet Bloch-Siegert et approximation séculaire (en Résonance Magnétique)	139

Partie II. Fonctionnement des lasers dans le modèle des probabilités de transition	143
8 L'amplification d'une onde de lumière	147
8.1 Les équations d'évolution des populations atomiques, coefficients d'Einstein	147
8.2 Sections efficaces d'interaction. Différence pondérée des populations	151
8.3 La saturation à forte intensité lumineuse	153
8.4 Coefficient d'absorption généralisé. L'inversion des populations, condition d'amplification	156
8.5 Les processus d'inversion ou de pompage	159
8.5.1 Le tri sur jet atomique ou moléculaire	159
8.5.2 Irradiation avec une autre onde électromagnétique sur une autre transition	160
8.5.3 Collisions électroniques, atomiques ou moléculaires dans les gaz	165
9 Équations fondamentales du laser oscillateur ou générateur	169
9.1 Amplification et oscillation. Rôle d'une cavité résonnante	169
9.2 Constante de temps et coefficient de qualité d'une cavité	171
9.3 Équation différentielle de l'énergie lumineuse. Seuil de fonctionnement	176
9.4 Comparaison avec le gain sur un tour de cavité	180
9.5 Équations différentielles des populations. Exemples de modélisation	182
9.5.1 Modèle à deux niveaux	182
9.5.2 Modèle à quatre niveaux	186
10 Régime continu de fonctionnement	191
10.1 Équation de l'énergie lumineuse. Populations au seuil	191
10.2 Raisonnement sur un tour. Gain saturé et gain non saturé	192
10.3 Bilan stationnaire des populations. Puissance de sortie	193
10.3.1 Modèle à deux niveaux	194
10.3.2 Modèle à quatre niveaux	196
10.4 Optimisation de la puissance de sortie	198
10.5 Bilan d'énergie. Compétition entre émissions spontanée et stimulée	201
11 Régimes variables ou impulsionnels	205
11.1 Oscillations de relaxation, conséquence des équations non linéaires couplées	205

11.2 Démarrage d'un laser continu	210
11.2.1 Laser à fibre optique, dopée au Nd^{3+} , démarré par l'irradiation du pompage optique	210
11.2.2 Laser à décharge de très faible puissance démarré par déblocage instantané de la cavité	212
11.3 Impulsions déclenchées	215
11.4 Calcul approché des impulsions géantes très courtes	220
11.5 Impulsions ultra courtes en blocage de modes	225
11.6 Dilatation et compression d'impulsion	232
12 Divers types de lasers	237
12.1 Gaz pompés par décharge électrique	237
12.2 Excimères ou Exciplexes	251
12.3 Pompage optique ou chimique dans les gaz	255
12.3.1 Pompage optique résonnant de vibrations moléculaires	255
12.3.2 Production de molécules excitées par photodissociation ou réaction chimique	258
12.4 Pompage optique en milieu condensé. Lasers accordables	259
12.5 Lasers à semi-conducteurs	266
12.6 Chaînes d'amplificateurs pour les fortes puissances	270
13 Fréquence de l'oscillation laser	275
13.1 Résonances de cavité et résonance atomique. Mode pulling	275
13.1.1 Correction des fréquences de résonance d'une cavité pleine	277
13.1.2 Cas d'un laser en régime continu	280
13.2 Élargissement homogène par collisions	282
13.2.1 Calcul des probabilités de collisions, vitesse relative et section efficace	282
13.2.2 Application aux transitions optiques résonnantes	285
13.3 Élargissement inhomogène. Classes d'atomes. Classes de vitesses	287
13.3.1 Classes d'atomes dans un environnement inhomogène	288
13.3.2 Effet Doppler dans un gaz (inhomogénéité dynamique)	291
13.4 « Hole burning », conséquence des classes d'atomes	295
13.5 Cas des gaz en cavités : résonance de saturation et Lamb-dip	298
13.6 Compétition de modes dans les lasers à gaz	303
14 Techniques de contrôle des fréquences laser	309
14.1 La première sélection de fréquence d'un laser accordable	309
14.1.1 Train de prismes	309
14.1.2 Réseau de diffraction	311
14.1.3 Filtre de Lyot	312
14.2 Cavité en anneau unidirectionnelle	314

14.3	Interféromètres en cascade dans un laser accordable monomode	317
14.4	Synchronisation par injection	320
14.5	Asservissements sur une raie fine. Standards de fréquence et de longueur	322
14.5.1	Le « jitter » en fréquence	322
14.5.2	Asservissement sur une raie de saturation	322
14.5.3	La mesure directe des fréquences optiques	325
14.6	Cohérence temporelle et spatiale	327
Partie III. Calcul des ondes émises		337
15	Le faisceau gaussien en espace libre	341
15.1	Approximation des ondes sphériques paraxiales	341
15.2	Limitation gaussienne de l'étendue du front d'onde	344
15.3	Rappel de la résolution des équations d'onde par la méthode de Kirchhoff	347
15.4	Application de la méthode de Kirchhoff à un faisceau paraxial : stabilité de la solution gaussienne	351
15.5	Caractéristiques de l'onde gaussienne	356
15.5.1	Rayon gaussien du profil transversal	357
15.5.2	Rayon de courbure du front d'onde	357
15.5.3	Amplitude et phase de l'onde	359
15.5.4	Directivité et inégalités de Heisenberg	362
15.6	Problèmes de détermination des caractéristiques gaussiennes . .	363
15.6.1	Rayon gaussien w_1 et rayon de courbure R_1 imposés dans un plan d'onde fixé P	363
15.6.2	Deux rayons gaussiens w_1 et w_2 imposés dans deux plans P et Q distants de D	364
15.7	Transformation de l'onde gaussienne par une lentille	366
15.7.1	Action d'une lentille sur le rayon de courbure de l'onde	366
15.7.2	Application au cas d'une onde gaussienne	368
15.8	Aspect vectoriel de l'onde gaussienne	371
16	Les modes d'une cavité linéaire	375
16.1	Le faisceau gaussien en cavité linéaire (modes gaussiens fondamentaux)	375
16.1.1	Discussion de la validité de ces calculs de modes	378
16.1.2	Condition de résonance de la cavité	383
16.2	Équation des ondes paraxiales (approximation de l'enveloppe lentement variable)	384
16.3	Solutions de l'équation paraxiale à variables x et y séparées. Modes transverses de Hermite-Gauss	387

16.4	Mise en évidence expérimentale des modes transverses	395
16.4.1	Cas d'une cavité passive	395
16.4.2	Cas d'une cavité active	397
16.4.3	Modes de symétrie circulaire, de Laguerre-Gauss	399
16.5	Comparaison avec les modes guidés	401
17	Propagation dépendant de la polarisation atomique	405
17.1	Couplage des équations d'onde et des équations quantiques de Bloch	405
17.2	Équations de Maxwell avec second membre. Ondes planes dans les milieux isolants, homogènes et <i>isotropes</i>	408
17.3	Onde plane progressive quasi sinusoïdale (approximation de l'enveloppe lentement variable). Laser amplificateur	411
17.4	Onde stationnaire dans une cavité laser (en dessous de la saturation)	415
17.4.1	Conséquence sur la phase et la fréquence. Mode pulling	419
17.4.2	Conséquence sur l'amplitude du champ	421
17.5	Effet de la saturation dans une onde stationnaire (laser oscillateur, modèle de Lamb)	422
17.5.1	Conséquence sur la phase et la fréquence	424
17.5.2	Conséquences de l'équation sur l'amplitude	425
17.6	Propagation d'impulsions ultracourtes : aires d'impulsion	429
17.6.1	Équations de Bloch sans relaxation	429
17.6.2	Élargissement inhomogène	430
17.6.3	Théorème des aires d'impulsion	431
17.6.4	Application à une impulsion de faible intensité	433
17.7	Impulsions ultracourtes très intenses. Autotransparence	434
17.7.1	Cas où l'aire d'impulsion est un multiple de π	435
17.7.2	Recherche d'une loi temporelle indéformable (solitons résonnants)	437
18	Les dipôles atomiques, sources de rayonnement	443
18.1	Onde rayonnée par un dipôle oscillant	443
18.2	Application au dipôle atomique créé par une onde incidente	446
18.2.1	Puissance cohérente rayonnée dans l'onde dipolaire	447
18.2.2	Puissance absorbée et dissipée par un atome	448
18.2.3	Cas des processus éloignés de la résonance	450
18.2.4	Bilan des énergies échangées. Puissance incohérente	451
18.3	Interférences des ondes dipolaires dans les directions obliques	455
18.3.1	En milieu condensé	456
18.3.2	Les fluctuations de densité dans un gaz	457
18.3.3	Diffusion par une onde sonore	460

18.4	Diffusion cohérente vers l'avant	463
18.4.1	Cône de cohérence	463
18.4.2	Faisceau incident gaussien (dispersion et absorption) . .	466
18.4.3	Puissance de l'onde résultante. Amplification	469
18.5	Superradiance due aux interactions entre voisins	470
18.6	L'émission spontanée amplifiée (ou A.S.E., Amplified Spontaneous Emission)	475
18.7	Émission libre cohérente et échos de photons	477
18.7.1	Brouillage des oscillations libres dans le noir par les inhomogénéités	477
18.7.2	La technique des échos	478
18.7.3	Observation expérimentale dans les solides et dans les gaz	482
19	Vecteur dipôle atomique et polarisation des ondes	487
19.1	Représentation standard du moment angulaire ou dipolaire . .	488
19.2	Théorème de Wigner-Eckart	491
19.3	Action d'une onde polarisée circulairement	492
19.4	Probabilités de transition et coefficients d'Einstein	495
19.4.1	Transition élémentaire entre deux états quantiques . . .	495
19.4.2	Coefficients d'Einstein	496
19.4.3	Utilisation des probabilités de transition	498
19.5	Diagrammes de rayonnement des transitions dipolaires électriques	503
19.6	Base standard	508
19.6.1	Définition. Produit scalaire hermitien	508
19.6.2	Application aux polarisations standard	509
19.6.3	Composantes standard d'un vecteur	510
19.7	Changements de base pour la polarisation lumineuse	511
	Notations	515
	Index	521

Bernard CAGNAC - Jean-Pierre FAROUX

LASERS

Interaction lumière-atomes

Cet ouvrage a d'abord pour objectif d'aider les étudiants et les scientifiques (universitaires et ingénieurs) qui souhaitent comprendre comment fonctionnent les lasers et/ou qui en ont besoin pour améliorer leur fonctionnement. Dans ce but, le langage des probabilités d'Einstein permet d'expliquer rapidement l'essentiel. On le complète en électromagnétisme par la description du faisceau gaussien et des modes du rayonnement, indispensable pour les expérimentateurs.

Le langage des probabilités n'est qu'une première approximation, incapable de décrire tous les aspects de l'interaction entre les atomes et la lumière. On développe donc aussi une première approche, aussi simple que possible, de l'interaction quantique entre l'atome et le champ électrique de l'onde (équations de Bloch optiques) : on montre dans quelles conditions le modèle des probabilités est applicable, mais aussi quelles sont ses limites. Parmi les nombreuses expériences présentées, une place importante est donnée aux phénomènes de diffusion de lumière, ainsi qu'aux phénomènes où l'explication quantique est indispensable (oscillation de Rabi, franges de Ramsey, « déplacement lumineux » de la fréquence de résonance, dédoublement Antler-Townes, super-radiance, échos de photons, solitons résonnants).

Bernard Cagnac et Jean-Pierre Faroux sont tous les deux professeurs à l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Ils ont préparé et soutenu leurs thèses d'état au sein du laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'École normale supérieure, dirigé par les professeurs Kastler et Brossel. C'est l'expérience acquise dans ce laboratoire sur la pratique des lasers, jointe à leur expérience d'enseignement en physique atomique, qui a permis l'écriture de ce livre.

Ces ouvrages, écrits par des chercheurs, reflètent des enseignements dispensés dans le cadre de la formation à la recherche. Ils s'adressent donc aux étudiants avancés, aux chercheurs désireux de perfectionner leurs connaissances ainsi qu'à tout lecteur passionné par la science contemporaine.

SAVOIRS ACTUELS

Collection dirigée par Michèle LEDUC

 CNRS EDITIONS

 EDP
SCIENCES


9 782868 835284

ISBN 2 86883 528 7

ISBN 2 271 05954 2