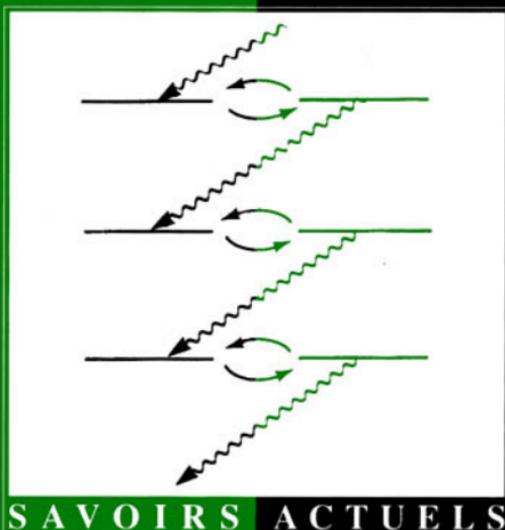


PHYSIQUE

Claude COHEN-TANNOUDJI
Jacques DUPONT-ROC — Gilbert GRYNBERG

Processus d'interaction • entre • photons et atomes



CNRS EDITIONS

Extrait de la publication

EDP
SCIENCES

Claude Cohen-Tannoudji • Jacques Dupont-Roc • Gilbert Grynberg

Processus d'interaction entre photons et atomes

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

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

© 2001, **EDP Sciences**, 7 avenue du Hoggar, BP 112, PA de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A.
CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

1^{re} édition :
© 1988, 1996 (tirage corrigé) **InterÉditions – CNRS ÉDITIONS**

Tous droits réservés. Aucun extrait de ce livre ne peut être reproduit, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit (machine électronique, mécanique, à photocopier, à enregistrer ou toute autre) sans l'autorisation écrite préalable des éditeurs.

ISBN 2-86883-358-6
ISBN 2-222-04027-2

Table des matières

<i>Avant-propos</i>	1
<i>Introduction</i>	3

I AMPLITUDES DE TRANSITION EN ÉLECTRODYNAMIQUE

<i>Introduction</i>	7
A. Amplitude de probabilité associée à un processus physique	9
B. Comportement temporel des amplitudes de transition	11
1. Couplage entre états discrets isolés	11
2. Couplage résonnant entre état discret et continuum	13
3. Couplages à l'intérieur d'un continuum ou entre continums	15
C. Application à l'électrodynamique	17
1. Hamiltonien en jauge de Coulomb	17
2. Développement vis-à-vis des charges q_α	18
3. Développement vis-à-vis de l'interaction avec le champ transverse	19
4. Avantages liés à la prise en compte de l'interaction de Coulomb dans l'hamiltonien des particules	20
5. Représentation diagrammatique des amplitudes de transition	21

COMPLÉMENT A_I - CALCUL PERTURBATIF DES AMPLITUDES DE TRANSITION QUELQUES FORMULES UTILES

<i>Introduction</i>	24
1. Point de vue d'interaction	24
2. Développement perturbatif des amplitudes de transition - <i>a. Développement perturbatif de l'opérateur d'évolution. b. Amplitude de transition d'ordre 1 en V. c. Amplitude de transition d'ordre 2 en V</i>	25

3. Probabilité de transition - <i>a. Calcul de la probabilité de transition vers un état final différent de l'état initial. b. Probabilité de transition entre deux états discrets. Calcul à l'ordre le plus bas en V. c. Cas où l'état final appartient à un continuum d'énergie. Densité d'états. d. Probabilité de transition par unité de temps vers un groupe d'états finals appartenant à un continuum d'énergie. e. Cas où l'état initial et l'état final appartiennent tous deux à un continuum</i>	31
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

COMPLÉMENT B_I - DESCRIPTION DE L'EFFET D'UNE PERTURBATION PAR UN HAMILTONIEN EFFECTIF

1. Introduction - But recherché	38
2. Principe de la méthode	41
3. Détermination de l'hamiltonien effectif - <i>a. Calcul de S ordre par ordre. b. Expression de l'hamiltonien effectif à l'ordre 2. c. Termes d'ordre supérieur</i>	42
4. Cas de deux systèmes en interaction	45

COMPLÉMENT C_I - NIVEAU DISCRET COUPLÉ À UN CONTINUUM LARGE ÉTUDE D'UN MODÈLE SIMPLE

<i>Introduction</i>	48
1. Description du modèle - <i>a. Etat discret et continuum. b. Discrétisation du continuum. c. Hypothèses simplificatrices</i>	49
2. Etats stationnaires du système. Souvenir de l'état discret dans le nouveau continuum - <i>a. Equation aux valeurs propres. b. Détermination graphique des nouvelles valeurs propres. c. Densité de présence de l'état discret dans le nouveau continuum</i>	50
3. Quelques applications de ce modèle simple - <i>a. Désintégration de l'état discret. b. Excitation du niveau discret à partir d'un autre état du système. c. Diffusion résonnante via l'état discret. d. Profils de Fano</i>	54
4. Généralisation à des continus plus réalistes. Diagonalisation de l'hamiltonien sans discrétisation	62

II

DESCRIPTION QUALITATIVE DE QUELQUES PROCESSUS D'INTERACTION ENTRE ATOMES ET PHOTONS

<i>Introduction</i>	65
A. Processus d'émission : un photon nouveau apparaît	67
1. Emission spontanée entre deux niveaux atomiques discrets. Désintégration radiative d'un niveau atomique excité - <i>a. Représentation diagrammatique. b. Probabilité d'émission spontanée par unité de temps. c. Résultats non perturbatifs</i>	67
2. Emission spontanée entre un état du continuum et un état discret - <i>a. Premier exemple : capture radiative. b. Deuxième exemple : dissociation radiative d'une molécule</i>	71
3. Emission spontanée entre deux états du continuum d'ionisation - Rayonnement de freinage	74
B. Processus d'absorption : un photon disparaît	76
1. Absorption entre deux états discrets	76
2. Absorption entre un état discret et un état du continuum - <i>a. Premier exemple : photoionisation. b. Deuxième exemple : photodissociation</i>	77
3. Absorption entre deux états du continuum d'ionisation : Bremsstrahlung inverse	80
4. Influence de l'état initial du champ sur la dynamique du processus d'absorption	81
C. Processus de diffusion : un photon disparaît et un autre photon apparaît	84
1. Amplitude de diffusion - Représentation diagrammatique.	84
2. Différents types de diffusion d'un photon par un système atomique ou moléculaire - <i>a. Diffusion élastique à basse énergie : diffusion Rayleigh. b. Diffusion inélastique à basse énergie : diffusion Raman. c. Diffusion élastique à haute énergie : diffusion Thomson. d. Diffusion inélastique à haute énergie avec état atomique final dans le continuum d'ionisation : diffusion Compton</i>	86
3. Diffusion résonnante	91
D. Processus multiphotoniques : plusieurs photons apparaissent ou disparaissent	96
1. Emission spontanée à deux photons	96
2. Absorption (et émission induite) multiphotonique entre deux états atomiques discrets	98

3. Ionisation multiphotonique	100
4. Génération d'harmoniques	102
5. Processus multiphotoniques et diffusion quasi résonnante	104
E. Corrections radiatives : des photons sont émis et réabsorbés (ou absorbés et réémis)	107
1. Corrections radiatives spontanées - <i>a. Cas d'un électron libre : correction de masse. b. Cas d'un électron atomique : largeur naturelle et déplacement radiatif</i>	107
2. Corrections radiatives stimulées	112
F. Interaction par échange de photons	116
1. Echange de photons transverses entre deux particules chargées : première correction à l'interaction de Coulomb	116
2. Interaction de Van der Waals entre deux atomes neutres - <i>a. Distance faible : $D \ll \lambda_{ab}$. b. Grande distance : $\lambda_{ab} \ll D$...</i>	119

COMPLÉMENT A_{II} - SIGNAUX DE PHOTODÉTECTION ET FONCTIONS DE CORRÉLATION

<i>Introduction</i>	125
1. Modèles simples de photodétecteurs atomiques - <i>a. Photodétecteur à bande large. b. Photodétecteur à bande étroite</i>	126
2. Probabilité d'excitation et fonctions de corrélation - <i>a. Hamiltonien-opérateur d'évolution. b. Calcul de la probabilité pour que l'atome ait quitté l'état fondamental au bout d'un temps Δt. c. Fonction de corrélation du dipôle atomique. d. Fonction de corrélation du champ</i>	127
3. Photodétection à bande large - <i>a. Condition sur les fonctions de corrélation. b. Probabilité de photoionisation par unité de temps</i>	134
4. Photodétection à bande étroite - <i>a. Condition sur le rayonnement incident et le détecteur. b. Excitation par un spectre de fréquences large. c. Effet de la largeur naturelle du niveau atomique excité</i>	137
5. Signaux de photodétection double - <i>a. Corrélation entre les signaux de deux photodétecteurs. b. Principales étapes du calcul de w_{II}</i>	140

COMPLÉMENT B_{II} - CORRECTIONS RADIATIVES DANS LE POINT DE VUE DE PAULI-FIERZ

<i>Introduction</i>	145
1. La transformation de Pauli-Fierz - <i>a. Hypothèses simplificatrices - Position du problème. b. Champ transverse lié à une particule classique. c. Détermination de la transformation de Pauli-Fierz</i>	146

2. Les observables dans le nouveau point de vue - <i>a. Transformation des champs transverses. b. Transformation des variables dynamiques des particules. c. Expression du nouvel hamiltonien</i>	150
3. Discussion physique - <i>a. Correction de masse. b. Nouvel hamiltonien d'interaction entre particule et champ transverse. c. Avantages du nouveau point de vue. d. Critique de la notion de champ lié à une particule</i> ...	155

III

ÉTUDE NON PERTURBATIVE DES AMPLITUDES DE TRANSITION

<i>Introduction</i>	161
A. Opérateur d'évolution et résolvente	163
1. Equation intégrale satisfaite par l'opérateur d'évolution	163
2. Fonctions de Green - Propagateurs	163
3. Résolvente de l'hamiltonien	165
B. Resommation formelle de la série de perturbation	168
1. Etude d'un exemple simple - Méthode diagrammatique	168
2. Méthode algébrique utilisant des opérateurs de projection - <i>a. Projecteur sur un sous-espace \mathcal{E}_0 de l'espace des états. b. Calcul de la restriction de la résolvente dans le sous-espace \mathcal{E}_0. c. Calcul des autres restrictions de $G(z)$. d. Interprétation de l'opérateur déplacement</i> .	170
3. Introduction de quelques approximations - <i>a. Calcul perturbatif de l'opérateur déplacement. Resommation partielle de la série de perturbation. b. Approximation consistant à négliger la dépendance en énergie de l'opérateur déplacement</i>	175
C. Etude de quelques exemples d'application	179
1. Evolution d'un état atomique excité - <i>a. Calcul non perturbatif de l'amplitude de probabilité pour que l'atome reste excité. b. Durée de vie et déplacement radiatifs. c. Conditions de validité du traitement précédent</i>	179
2. Distribution spectrale des photons émis spontanément par un atome excité - <i>a. Élément de matrice de la résolvente associé au processus étudié. b. Généralisation à une cascade radiative. c. Largeur naturelle et déplacement des raies émises</i>	185
3. Couplage indirect entre un niveau discret et un continuum. Exemple de la transition de Lamb - <i>a. Présentation du problème. b. Calcul non perturbatif de l'amplitude de transition. c. Cas d'un couplage faible. Formule de Bethe. d. Cas d'un couplage fort. Oscillation de Rabi</i>	193

4. Couplage indirect entre deux niveaux discrets. Les transitions multiphotoniques - <i>a. Phénomène physique étudié et sous-espace \mathcal{E}_0 des états privilégiés. b. Calcul non perturbatif des amplitudes de transition. c. Cas d'un couplage faible. Probabilité d'excitation à deux photons par unité de temps. d. Cas d'un couplage fort. Oscillation de Rabi à deux photons. e. Transition multiphotonique d'ordre plus élevé. f. Limites du traitement précédent</i>	200
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

COMPLÉMENT A_{III} - PROPRIÉTÉS ANALYTIQUES DE LA RÉSOUVANTE

<i>Introduction</i>	208
1. Analyticit� de la résolvante en dehors de l'axe réel	208
2. Etude des singularités sur l'axe réel	210
3. Etats instables et pôles du prolongement analytique	212
4. Intégrale de contour et corrections à la décroissance exponentielle	215

COMPLÉMENT B_{III} - EXPRESSIONS NON PERTURBATIVES POUR LES AMPLITUDES DE DIFFUSION D'UN PHOTON PAR UN ATOME

<i>Introduction</i>	217
1. Amplitude de transition entre �tats non perturbés - <i>a. Utilisation de la résolvante. b. Matrice de transition. c. Application à la diffusion résonnante. d. Insuffisances de l'approche précédente</i>	218
2. Introduction d'�tats asymptotiques exacts - <i>a. L'atome en l'absence de photons libres. b. L'atome en présence d'un photon libre</i>	224
3. Amplitude de transition entre �tats asymptotiques exacts - <i>a. Nouvelle définition de la matrice S. b. Nouvelle expression de la matrice de transition. Discussion physique</i>	227

COMPLÉMENT C_{III} - ÉTAT DISCRET COUPLÉ   UN CONTINUUM DE LARGEUR FINIE TRANSITION ENTRE LA DÉCROISSANCE EXPONENTIELLE DE WEISSKOPF-WIGNER ET L'OSCILLATION DE RABI

1. Introduction - Idée générale	233
2. Présentation du modèle - <i>a. Etats non perturbés. b. Hypothèses sur le</i>	

<i>couplage. c. Calcul de la résolvante et des propagateurs. d. Transformée de Fourier de l'amplitude $U_b(\tau)$</i>	234
3. Les paramètres physiques importants - <i>a. Fonction $\Gamma_b(E)$. b. Paramètre Ω_1 caractérisant le couplage de l'état discret avec tout le continuum. c. Fonction $\Delta_b(E)$</i>	237
4. Principe de la construction graphique - <i>a. Construction point par point de $\mathcal{U}_b(E)$. b. Détermination graphique des abscisses des maxima de $\mathcal{U}_b(E)$ - Classification des divers régimes</i>	240
5. Couplage faible - <i>a. Décroissance exponentielle de Weisskopf-Wigner. b. Corrections à la décroissance exponentielle</i>	242
6. Couplage intermédiaire - Couplage critique - <i>a. Développement de $\mathcal{U}_b(E)$ au voisinage d'un maximum. b. Sens physique du couplage critique</i>	244
7. Couplage fort	246

IV

LE RAYONNEMENT CONSIDÉRÉ COMME UN RÉSERVOIR : ÉQUATION PILOTE POUR LES PARTICULES

A. Introduction - Idée générale	249
B. Établissement de l'équation pilote d'un petit système \mathcal{A} couplé à un réservoir \mathcal{R}	254
1. Equation d'évolution du petit système en représentation d'interaction	254
2. Hypothèses sur le réservoir - <i>a. Etat du réservoir. b. Valeurs moyennes à un et deux temps des observables de \mathcal{R} couplées à \mathcal{A}</i>	255
3. Calcul perturbatif de la vitesse de variation à gros grains du petit système	258
4. Equation pilote dans la base des états d'énergie du petit système	260
C. Contenu physique de l'équation pilote	264
1. Evolution des populations	264
2. Evolution des cohérences	266
D. Discussion des approximations	269
1. Ordre de grandeur du temps d'évolution de \mathcal{A}	269
2. Condition d'existence de deux échelles de temps	269
3. Condition de validité du développement perturbatif	270
4. Factorisation de l'opérateur densité global à l'instant t	270
5. Récapitulation	272

E. Application à un atome à deux niveaux couplé au rayonnement	273
1. Evolution des degrés de liberté internes - <i>a. Equation pilote décrivant l'émission spontanée d'un atome à deux niveaux. b. Termes supplémentaires décrivant l'absorption et l'émission induite d'un rayonnement à large bande spectrale et faible intensité</i>	273
2. Evolution des vitesses atomiques - <i>a. Prise en compte des degrés de liberté de translation dans l'équation pilote. b. Equation de Fokker-Planck pour la fonction de distribution des vitesses atomiques. c. Evolution de l'impulsion moyenne et de la dispersion sur les impulsions. d. Distribution stationnaire. Equilibre thermodynamique</i>	279

COMPLÉMENT A_{IV} - FLUCTUATIONS ET RÉPONSE LINÉAIRE APPLICATION AUX PROCESSUS RADIATIFS

<i>Introduction</i>	291
1. Fonctions statistiques et interprétation de l'équation pilote - <i>a. Fonction de corrélation symétrique. b. Susceptibilité linéaire. c. Energie de polarisation et dissipation. d. Interprétation physique du déplacement des niveaux d'énergie. e. Interprétation physique des échanges d'énergie</i>	291
2. Application aux processus radiatifs - <i>a. Calcul des fonctions statistiques. b. Discussion physique. c. Déplacement des niveaux d'énergie dû aux fluctuations du champ de rayonnement. d. Déplacement des niveaux d'énergie dû à la réaction de rayonnement. e. Les échanges d'énergie entre l'atome et le rayonnement</i>	300

COMPLÉMENT B_{IV} - ÉQUATION PILOTE POUR UN OSCILLATEUR HARMONIQUE AMORTI

1. Système physique considéré	309
2. Forme opératorielle de l'équation pilote	310
3. Equation pilote dans la base des états propres de H_A - <i>a. Evolution des populations. b. Evolution de quelques valeurs moyennes</i>	313
4. Equation pilote dans une base d'états cohérents - <i>a. Brefs rappels sur les états cohérents et sur la représentation P_N de l'opérateur densité. b. Equation d'évolution pour $P_N(\beta, \beta^*, t)$. c. Discussion physique</i>	316

COMPLÉMENT C_{IV} - EQUATIONS DE LANGEVIN QUANTIQUES POUR UN SYSTÈME PHYSIQUE SIMPLE

<i>Introduction</i>	321
1. Rappels sur la théorie classique du mouvement Brownien - <i>a. Equation de Langevin. b. Interprétation du coefficient D. Lien entre fluctuations et dissipation. c. Etude de quelques fonctions de corrélation</i>	321
2. Equations de Heisenberg-Langevin pour un oscillateur harmonique amorti - <i>a. Equations de Heisenberg couplées. b. Equation de Langevin et force de Langevin quantiques. c. Lien entre fluctuations et dissipation. d. Moyennes à deux temps mixtes faisant intervenir les forces de Langevin et les opérateurs b et b^* de \mathcal{A}. e. Vitesses de variation des variances \mathcal{V}_N et \mathcal{V}_A. f. Généralisation de la relation d'Einstein. g. Calcul des moyennes à deux temps des opérateurs de \mathcal{A}. Théorème de régression quantique</i>	327

V

ÉQUATIONS DE BLOCH OPTIQUES

<i>Introduction</i>	337
A. Equations de Bloch optiques pour un atome à deux niveaux	340
1. Description du rayonnement incident	340
2. Approximation des vitesses de variation indépendantes	341
3. Approximation du champ tournant - <i>a. Elimination des termes antirésonnants. b. Forme indépendante du temps des équations de Bloch optiques. c. Autres formes des équations de Bloch optiques</i>	342
4. Représentation géométrique en termes de spin $\frac{1}{2}$ fictif	345
B. Discussion physique - Différences avec d'autres équations d'évolution	348
1. Différence avec des équations de relaxation. Couplages entre populations et cohérences	348
2. Différences avec des équations d'évolution hamiltoniennes	348
3. Différences avec des équations de Heisenberg-Langevin	349
C. Première application - Evolution des valeurs moyennes atomiques	351
1. Degrés de liberté internes - <i>a. Allure du régime transitoire. b. Etude du régime stationnaire. c. Bilan d'énergie. Nombre moyen de photons incidents absorbés par unité de temps</i>	351

2. Degrés de liberté externes. Forces radiatives moyennes - <i>a. Equation du mouvement du centre du paquet d'ondes atomique. b. Les deux types de forces pour un atome initialement immobile. c. Force dissipative. Pression de radiation. d. Force réactive. Force dipolaire</i>	354
D. Propriétés de la lumière émise par l'atome	363
1. Signaux de photodétection et moyennes à un ou deux temps du dipôle émetteur - <i>a. Lien entre le champ rayonné et le dipôle émetteur. b. Expression des signaux de photodétection</i>	363
2. Intensité totale de la lumière émise - <i>a. Proportionnalité à la population du niveau atomique excité. b. Diffusion cohérente et diffusion incohérente. c. Contributions respectives de la diffusion cohérente et incohérente à l'intensité totale émise en régime stationnaire</i>	366
3. Répartition spectrale de la lumière émise en régime stationnaire - <i>a. Contributions respectives de la diffusion cohérente et incohérente - Spectres élastique et inélastique. b. Principe du calcul du spectre inélastique. c. Allure du spectre inélastique dans quelques cas limites</i>	368

COMPLÉMENT A_V - ÉQUATIONS DE BLOCH-LANGEVIN THÉORÈME DE RÉGRESSION QUANTIQUE

<i>Introduction</i>	372
1. Equations de Heisenberg couplées de l'atome et du champ - <i>a. Hamiltonien et base d'opérateurs du système. b. Equation d'évolution des observables de l'atome et du champ. c. Approximation du champ tournant. Changement de variables. d. Comparaison avec le cas de l'oscillateur harmonique</i>	372
2. Etablissement des équations de Heisenberg-Langevin - <i>a. Choix de l'ordre normal. b. Contribution du champ des sources. c. Récapitulation. Discussion physique</i>	377
3. Propriétés des forces de Langevin - <i>a. Relations de commutation entre dipôle atomique et champ libre. b. Calcul des fonctions de corrélation des forces de Langevin. c. Théorème de régression quantique. d. Relations d'Einstein généralisées</i>	382

VI LA MÉTHODE DE L'ATOME HABILÉ

A. Introduction : l'atome habillé	389
B. Niveaux d'énergie de l'atome habillé	392
1. Modélisation du faisceau laser	392
2. Etats non couplés du système atome + photons laser	393
3. Le couplage atome-photons laser - <i>a. Hamiltonien d'interaction. b. Couplages résonnants et non résonnants. c. Périodicité locale du diagramme d'énergie. d. Introduction de la fréquence de Rabi</i>	395
4. Les états propres de l'atome habillé - <i>a. Niveaux d'énergie et fonctions d'onde. b. Diagramme d'énergie en fonction de $\hbar\omega_L$</i>	396
5. Manifestations physiques des processus d'absorption et d'émission induite	398
C. La fluorescence de résonance interprétée comme une cascade radiative de l'atome habillé	400
1. Les divers temps caractéristiques du problème	400
2. La cascade radiative dans la base non couplée - <i>a. Evolution temporelle du système. b. Dégrouperment de photons. c. Délais entre deux émissions spontanées successives</i>	401
3. La cascade radiative dans la base des niveaux habillés - <i>a. Transitions permises entre niveaux habillés. b. Triplet de fluorescence. c. Corrélations temporelles entre photons de fluorescence filtrés en fréquence</i>	404
D. Equation pilote de l'atome habillé	408
1. Forme générale de l'équation pilote - <i>a. Approximation des vitesses de variation indépendantes. b. Comparaison avec les équations de Bloch optiques</i>	408
2. Equation pilote dans la base des niveaux habillés à la limite séculaire - <i>a. Avantages de la base couplée à la limite séculaire. b. Evolution des populations. c. Evolution des cohérences - Transferts de cohérence. d. Populations réduites et cohérences réduites</i>	410
3. Etat quasi stationnaire pour la cascade radiative - <i>a. Matrice densité initiale. b. Régime transitoire et état quasi stationnaire</i>	415
E. Etude de quelques applications	418
1. Largeurs et poids des diverses composantes du triplet de fluorescence - <i>a. Evolution du dipôle moyen. b. Largeurs et intensités des raies latérales. c. Structure de la raie centrale</i>	418

2. Spectre d'absorption d'un second faisceau laser sonde - *a. Problème physique considéré. b. Cas où les deux lasers excitent la même transition. c. Cas où les deux lasers excitent deux transitions partageant un niveau commun - Effet Autler-Townes* 422
3. Corrélations de photons - *a. Calcul du signal de corrélation de photons. b. Discussion physique. c. Généralisation à un système à trois niveaux : fluorescence intermittente* 427
4. Forces dipolaires - *a. Niveaux d'énergie de l'atome habillé dans une onde laser inhomogène spatialement. b. Interprétation de la force dipolaire moyenne. c. Fluctuations de la force dipolaire* 434

COMPLÉMENT A_{VI} - L'ATOME HABILÉ DANS LE DOMAINE DES RADIOFRÉQUENCES

- Introduction* 440
1. Généralités sur les résonances de croisement et d'anticroisement - *a. Anticrossing simple sur un système à deux niveaux. b. Anticrossing d'ordre supérieur. c. Croisement de niveaux. Résonance de cohérence* . 441
 2. Spin $\frac{1}{2}$ habillé par des photons de radiofréquence - *a. Description du système. b. Hamiltonien d'interaction entre l'atome et le champ de radiofréquence. c. Préparation et détection* 448
 3. Le cas simple des photons de polarisation circulaire - *a. Le diagramme d'énergie. b. La résonance magnétique interprétée comme une résonance d'anticroisement de l'atome habillé. c. Résonances de croisement des niveaux habillés* 452
 4. Photons de radiofréquence de polarisation linéaire - *a. Présentation des effets nouveaux. b. Le déplacement de Bloch-Siegert. c. Le spectre impair de résonances d'anticroisement. d. Le spectre pair de résonances de croisement. e. Un calcul non perturbatif : le facteur de Landé de l'atome habillé. f. Evolution qualitative du diagramme d'énergie aux fortes intensités* 458

COMPLÉMENT B_{VI} - PROCESSUS COLLISIONNELS EN PRÉSENCE D'IRRADIATION LASER

- Introduction* 468
1. Relaxation collisionnelle en l'absence d'irradiation laser - *a. Hypothèses simplificatrices. b. Equation pilote décrivant l'effet des collisions sur l'atome émetteur* 469

2. Relaxation collisionnelle en présence d'irradiation laser - <i>a. Le point de vue de l'atome habillé. b. Evolution des populations : transferts collisionnels entre niveaux habillés. c. Evolution des cohérences. Amortissement et déplacement collisionnels. d. Forme explicite de l'équation pilote à la limite d'impact</i>	472
3. Modifications introduites par les collisions sur l'émission et l'absorption de lumière par l'atome. Redistribution collisionnelle - <i>a. Prise en compte de l'émission spontanée. b. Populations réduites stationnaires. c. Intensité des trois composantes du triplet de fluorescence. d. Interprétation physique à la limite $\Omega_1 \ll \delta_L \ll \tau_{\text{coll}}^{-1}$</i>	478
4. Aperçu sur le calcul du taux de transfert collisionnel - <i>a. Expression du taux de transfert en fonction de la matrice S de collision. b. Cas où la fréquence laser devient résonnante au cours de la collision. Limite des grands désaccords</i>	486

EXERCICES

1. Calcul de la durée de vie radiative d'un niveau atomique excité. Comparaison avec le temps d'amortissement d'un dipôle classique ...	491
2. Emission spontanée par un ion piégé. Effet Lamb-Dicke	494
3. Diffusion Rayleigh	499
4. Diffusion Thomson	503
5. Diffusion résonnante	506
6. Détection optique du croisement de deux niveaux atomiques excités	509
7. Déplacement radiatif d'un niveau atomique. Formule de Bethe pour le déplacement de Lamb	513
8. Rayonnement de freinage. Corrections radiatives à la diffusion élastique par un potentiel	522
9. Rayonnement de freinage de basse fréquence. Etude non perturbative de la « catastrophe infrarouge »	531
10. Modification de la fréquence cyclotron d'une particule par interaction avec le rayonnement	538
11. Interactions magnétiques entre spins	544
12. Modification du moment magnétique d'un atome due à l'interaction avec les fluctuations du champ magnétique du vide	549
13. Excitation d'un atome par un paquet d'ondes : absorption en raie large et en raie étroite	553
14. Emission spontanée d'un ensemble de deux atomes proches. Etats superradiants et états subradiants	558
15. Cascade radiative d'un oscillateur harmonique	563
16. Principe du bilan détaillé	569
17. Equivalence entre un champ quantique dans un état cohérent et un champ extérieur	571

18. Elimination adiabatique des cohérences et transformation des équations de Bloch optiques en équations de relaxation	575
19. Susceptibilité non linéaire pour un ensemble d'atomes à deux niveaux. Etude de quelques applications	578
20. Absorption d'une onde sonde par des atomes soumis à une onde intense. Application à l'absorption saturée	583

APPENDICE — RÉSUMÉ SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN JAUGE DE COULOMB

1. Description du champ électromagnétique - <i>a. Champs électrique \mathbf{E} et magnétique \mathbf{B}. b. Potentiels vecteur \mathbf{A} et scalaire U. c. Jauge de Coulomb. d. Variables normales. e. Principe de la quantification canonique en jauge de Coulomb. f. Les champs quantiques en jauge de Coulomb</i>	593
2. Les particules	600
3. Hamiltonien et dynamique en jauge de Coulomb - <i>a. Hamiltonien. b. Hamiltoniens non perturbés et hamiltonien d'interaction. c. Les équations du mouvement</i>	601
4. Espace des états	604
5. Approximation des grandes longueurs d'onde et point de vue dipolaire électrique - <i>a. La transformation unitaire. b. Les grandeurs physiques dans le point de vue dipolaire. c. Induction électrique. d. Hamiltonien dipolaire électrique</i>	606
<i>Liste des ouvrages cités en référence</i>	611
<i>Index</i>	615

Avant-propos

Le développement spectaculaire de nouvelles sources de rayonnement électromagnétique, couvrant un domaine de fréquences allant des ondes radio à l'ultra-violet lointain (lasers, masers, rayonnement synchrotron, sources millimétriques), a renouvelé considérablement l'intérêt porté aux processus d'interaction entre photons et atomes. De nouvelles méthodes sont apparues, permettant d'obtenir des informations de plus en plus précises sur la structure et la dynamique des atomes et des molécules, de contrôler leurs degrés de liberté internes et externes ou de générer de nouveaux types de rayonnements. Ces développements font qu'un nombre croissant de physiciens et de chimistes, de chercheurs et d'ingénieurs, s'intéressent aux processus d'interaction entre matière et rayonnement à basse énergie. L'ambition de cet ouvrage est de mettre à leur disposition les bases théoriques nécessaires pour aborder l'étude de ces processus en partant d'un niveau en mécanique quantique et en électromagnétisme classique correspondant à celui de la maîtrise.

Un tel programme comporte naturellement deux volets. Il faut, d'une part, présenter le cadre théorique permettant de décrire la dynamique quantique du système global « champ électromagnétique + particules chargées non relativistes », discuter le contenu physique de la théorie et les diverses formulations que l'on peut en donner. Ces problèmes sont étudiés dans un volume déjà paru et intitulé « Photons et Atomes - Introduction à l'Electrodynamique Quantique ». Il faut, d'autre part, montrer comment un tel cadre théorique permet d'analyser les processus d'interaction entre photons et atomes tels qu'ils apparaissent en physique atomique et moléculaire, en optique quantique et en physique des lasers. Tel est l'objet du présent volume intitulé « Processus d'Interaction entre Photons et Atomes ». Les objectifs de ces deux volumes sont donc clairement distincts et, suivant ses préoccupations ou ses besoins, le lecteur pourra utiliser l'un, l'autre ou les deux volumes de cet ouvrage.

Il est bien sûr exclu de pouvoir présenter dans ce seul volume une étude exhaustive des processus d'interaction entre matière et rayonnement et de tous les phénomènes physiques auxquels ils donnent naissance. Nous avons donc mis l'accent sur les aspects qui nous

semblent essentiels. Tout d'abord, nous analysons en détail les processus élémentaires au cours desquels des photons sont émis, absorbés, diffusés, émis et réabsorbés, échangés par des atomes, en nous aidant au maximum de représentations diagrammatiques qui permettent de visualiser les processus étudiés. La connaissance de ces processus élémentaires n'est cependant pas toujours suffisante pour analyser simplement la très grande variété de phénomènes qui peuvent résulter de l'imbrication de ces processus. Il nous a donc semblé important de regrouper aussi dans cet ouvrage différentes approches théoriques, qui sont généralement dispersées dans des ouvrages plus spécialisés, et qui sont plus particulièrement adaptées à tel ou tel aspect des phénomènes étudiés (méthodes perturbatives, méthode de la résolvante, équation pilote, équation de Langevin, équations de Bloch optiques, méthode de l'atome habillé...). Enfin, nous avons choisi d'illustrer ces méthodes sur des systèmes très simples, de manière à pouvoir dégager aussi clairement que possible leur intérêt et leurs limites. Nous espérons avoir ainsi intégré dans ce volume les éléments de base permettant de dominer la physique de l'interaction matière-rayonnement sous ses divers aspects.

Remerciements

Cet ouvrage s'appuie sur un travail d'enseignement et de recherche qui s'est poursuivi pendant plusieurs années au Collège de France et au Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure. Nous tenons ici à exprimer tous nos remerciements à nos collègues et amis, en particulier Serge Reynaud et Jean Dalibard, qui ont directement participé à ces recherches ou qui nous ont fait bénéficier de leurs réflexions.

Nous sommes tout particulièrement reconnaissants à Martine Guillaume qui a assuré la saisie sur traitement de textes du manuscrit et de toutes les équations.

Collection « **Savoirs Actuels** »

Directeur : Michèle Leduc

Physique

- *Analyse continue par ondelettes*, B. Torrèsani
- *Des phénomènes critiques aux champs de jauge. Une introduction aux méthodes et aux applications de la théorie quantique des champs*, M. Le Bellac
- *Gravitation relativiste*, R. Hakim
- *Magnétisme et supraconductivité*, L.P. Lévy
- *Photons et atomes – Introduction à l'électrodynamique quantique*, C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc, G. Grynberg
- *Physique des plasmas* (tome 1 et tome 2), A. Bers, J.-L. Delcroix
- *Processus d'interaction entre photons et atomes*, C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc, G. Grynberg
- *Théorie des formes de croissance – Digitations, dendrites et flammes*, P. Pelcé
- *Théorie statistique des champs* (tome 1 et tome 2), J.-M. Drouffe, C. Itzykson

Chimie

- *Aspects de la chimie des composés macrocycliques*, B. Dietrich, J.-M. Lehn, P. Viout
- *Chimie moléculaire et supramoléculaire des sucres – Introduction chimique aux glycosciences*, S. David
- *De la solution à l'oxyde – Condensation des cations en solution aqueuse. Chimie de surface des oxydes*, J.-P. Jolivet avec le concours de M. Henry et J. Livage
- *Éléments de chimie quantique à l'usage des chimistes*, J.-L. Rivail
- *Liaisons intermoléculaires – Les forces en jeu dans la matière condensée*, A. Gerschel
- *Orbitales frontières*, Nguyễn Trong Anh
- *Synthèse et catalyse asymétriques – Auxiliaires et ligands chiraux*, J. Seyden-Penne

Astrophysique

- *Les Étoiles*, F. Praderie, E. Schatzman
- *Galaxies et cosmologie*, A. Blanchard, P. Boissé, F. Combes, A. Mazure
- *Méthodes physiques de l'observation*,
P. Léna avec le concours de F. Lebrun et F. Mignard

Mathématiques

- *Géométrie algébrique – Une introduction*, D. Perrin
- *Groupes quantiques – Introduction au point de vue formel*, A. Guichardet
- *Opérateurs pseudo-différentiels et théorème de Nash-Moser*,
S. Alinhac, P. Gérard
- *Théorie des fonctions holomorphes de plusieurs variables*,
Ch. Laurent-Thiébaud

par  **Achevé d'imprimer
en juillet 2001
IMPRIMERIE LIENHART
à Aubenas d'Ardeche**

Dépôt légal juillet 2001

N° d'imprimeur : 3440

Printed in France