

Physique atomique et moléculaire

M. Claude COHEN-TANNOUDJI, membre de l'Institut
(Académie des Sciences), professeur

Le cours 1993-1994 a poursuivi l'étude, commencée lors du cours précédent, de l'interférométrie atomique. Il s'agit de décrire et d'analyser des expériences récentes permettant d'observer des phénomènes d'interférence, analogues à ceux qui sont bien connus en optique, et où les ondes lumineuses sont remplacées par les ondes de de Broglie associées au centre de masse d'un atome.

Le cours commence par un bref rappel du formalisme théorique mis en place dans le cours précédent et reposant sur les intégrales de chemin de Feynman. On redonne l'expression du propagateur quantique permettant de décrire la propagation de la fonction d'onde d'une particule, et on étudie un certain nombre de situations simples (limite semiclassique, Lagrangiens quadratiques en coordonnées et vitesses) où la phase du propagateur est aisément calculable en fonction d'une intégrale de chemin évaluée le long d'une trajectoire classique. Une telle approche est particulièrement bien adaptée à l'analyse d'expériences d'interférométrie atomique en présence de champs extérieurs ayant une variation spatiale suffisamment lente (comme le champ de gravitation) ou de champs inertiels, apparaissant par exemple dans un référentiel en mouvement de rotation. Le déphasage entre les deux bras de l'interféromètre peut alors être écrit sous la forme d'une intégrale de chemin évaluée le long d'une trajectoire classique fermée. Pour des champs extérieurs ou inertiels suffisamment faibles, il est même possible d'utiliser la trajectoire libre, c'est-à-dire non perturbée par le champ.

Diffraction d'ondes de de Broglie atomiques par des réseaux de fentes

Une telle approche est tout d'abord appliquée au problème de la diffraction d'une onde plane de de Broglie par un réseau de fentes périodiquement espacées. Les angles de diffraction sont calculés en fonction de la longueur

d'onde de de Broglie λ de la particule incidente et de la distance d entre deux fentes successives.

Deux séries d'expériences réalisées, l'une au M.I.T. sur des atomes de Sodium, l'autre à Constance sur des atomes d'Hélium métastable, sont alors décrites car elles ont permis de mettre en évidence ces phénomènes de diffraction. On analyse également une troisième série d'expériences utilisant des réseaux circulaires de fentes concentriques (zones de Fresnel) et permettant de focaliser des ondes de de Broglie atomiques.

L'utilisation de trois réseaux de fentes, identiques et équidistants, permet de réaliser un interféromètre atomique à division d'amplitude. Le premier réseau R_1 décompose l'onde atomique incidente en deux ondes cohérentes qui sont diffractées par le deuxième réseau R_2 et viennent finalement se recombiner sur le troisième réseau R_3 . Un tel interféromètre a été réalisé récemment au M.I.T. Il a l'avantage d'être achromatique. De plus, pour des fentes suffisamment rapprochées sur chaque réseau, et des distances suffisamment grandes entre R_1 et R_2 (ou R_2 et R_3), la séparation des deux faisceaux atomiques incidents au niveau de R_2 peut être supérieure à leur largeur. Il est possible alors d'insérer une cloison entre les deux faisceaux et de perturber de manière différente les atomes qui passent par l'un ou l'autre chemin, une telle perturbation étant détectée par un déplacement des franges observées à la sortie de l'interféromètre. Deux résultats récents obtenus au moyen d'un tel interféromètre sont alors décrits. L'un concerne la polarisation de l'état fondamental de l'atome de Sodium qui a pu être mesurée en appliquant un champ électrique sur l'un des deux côtés de la cloison, l'autre la mesure de la partie réelle de l'amplitude de diffusion vers l'avant lors de collisions des atomes de Sodium avec un gaz rare introduit sur l'un des deux côtés de la cloison.

Diffraction d'ondes de de Broglie atomiques par des ondes laser stationnaires quasi-résonnantes

Un atome traversant à angle droit une onde laser stationnaire quasi-résonnante subit une perturbation périodique dans l'espace. Il s'agit là d'une situation analogue à celle rencontrée lors de la traversée d'un réseau de fentes équidistantes. Le cours se poursuit par une analyse des différents phénomènes de diffraction qui peuvent être observés dans de telles conditions. L'étude est tout d'abord restreinte au cas où la durée T de traversée de l'onde stationnaire par l'atome est suffisamment brève pour que tout processus d'émission spontanée d'un photon par l'atome puisse être négligée.

Considérations générales

On commence par analyser les conséquences des principes de conservation. Comme les seuls processus possibles sont des absorptions et émissions induites

de photons laser par l'atome, l'impulsion de ce dernier ne peut varier que par des multiples entiers n de l'impulsion $\hbar\mathbf{k}_L$ d'un photon laser, n étant pair si l'atome, partant de l'état fondamental g , se retrouve dans l'état g à l'issue du processus, n étant impair si l'atome, partant de g , se retrouve dans l'état excité e . Lorsque n est pair, le processus physique correspond à une redistribution de photons entre les deux ondes progressives formant l'onde laser : $n/2$ photons disparaissent d'une onde progressive pour réapparaître dans l'autre. Ces processus de redistribution sont prépondérants par rapport aux autres quand le désaccord de fréquence $\delta = \omega_L - \omega_A$ entre la fréquence laser ω_L et la fréquence atomique ω_A est suffisamment grand.

Comme l'onde laser est monochromatique de fréquence ω_L , l'énergie du champ laser ne change pas au cours d'un processus de redistribution. L'énergie $n\hbar\omega_L/2$ des $n/2$ photons qui disparaissent d'une onde est égale à celle, $n\hbar\omega_L/2$ des $n/2$ photons qui réapparaissent dans l'autre onde. La conservation de l'énergie globale entraîne alors que l'impulsion finale \mathbf{p}_f de l'atome doit avoir le même module que l'impulsion initiale \mathbf{p}_i , puisque l'énergie de l'atome, qui se réduit à l'énergie cinétique, est proportionnelle à \mathbf{p}^2 . L'extrémité des vecteurs impulsion \mathbf{p}_f de l'atome, à l'issue de la traversée de l'onde, doit donc être située sur la même sphère que le vecteur \mathbf{p}_i décrivant l'impulsion initiale.

Une telle analyse conduit alors tout naturellement à distinguer deux régimes limites. Le premier correspond à une onde laser très focalisée, avec un rayon focal w_0 très petit. L'impulsion des photons laser a alors une dispersion de l'ordre de $\delta p \sim \hbar/w_0$ dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation moyenne des ondes laser. Comme \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_f diffèrent de n fois l'impulsion $\hbar\mathbf{k}_L$ d'un photon laser (avec n pair), et que $\hbar\mathbf{k}_L$ peut varier légèrement en direction, les extrémités de \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_f peuvent être situées sur la même sphère, quelle que soit la direction initiale de \mathbf{p}_i (dans un certain intervalle angulaire autour d'une direction moyenne perpendiculaire à la direction de l'onde laser). Un tel régime, correspondant à des largeurs de traversée w_0 de l'onde laser très faibles, est appelé « régime de Raman-Nath ». L'autre régime correspond à des largeurs de traversée w_0 suffisamment grandes pour qu'on puisse considérer que tous les photons laser ont une impulsion laser $\hbar\mathbf{k}_L$ exactement parallèle à la direction $\boldsymbol{\kappa}$ de l'onde laser. Les impulsions \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_f qui diffèrent d'un nombre pair de fois $\hbar\mathbf{k}_L$ doivent donc être symétriques par rapport à $\boldsymbol{\kappa}$. La diffraction ne peut alors se produire que pour certaines directions bien définies de \mathbf{p}_i comme dans la diffraction de Bragg par un cristal. C'est pourquoi un tel régime est appelé « régime de Bragg ».

Régime de Raman-Nath

On montre tout d'abord que l'approximation à la base d'un tel régime consiste à négliger l'énergie cinétique de l'atome le long de l'onde laser ou, ce qui revient au même, à négliger le déplacement de l'atome le long de l'onde

laser au cours de la traversée de l'onde laser. La situation est alors tout à fait analogue à celle de la diffraction par un réseau de phase mince en optique.

Pour calculer le déphasage $\Phi(z)$ en chaque point z de traversée, il est commode d'utiliser la base des états de l'atome « habillé » par les photons laser. Un tel calcul est exposé en détail et conduit à des expressions analytiques pour les amplitudes des ondes diffractées, faisant intervenir des fonctions de Bessel. Les expressions obtenues sont interprétées physiquement et confrontées aux résultats expérimentaux obtenus au M.I.T. sur des atomes de Sodium.

Régime de Bragg

Dans la diffraction de Bragg d'ordre le plus bas, \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_f diffèrent de $2\hbar\mathbf{k}_L$. On montre que les états atomiques correspondants sont couplés par un processus Raman stimulé résonnant. A ce processus résonnant est associée une oscillation de Rabi dont la fréquence est calculée. L'effet des couplages des états initial et final avec d'autres états excités non résonnants est également évalué de manière à déterminer à quelle condition un tel couplage ne brouille pas l'oscillation de Rabi. Ces considérations sont généralisées à des processus de Bragg d'ordre supérieur, où \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_f diffèrent de $4\hbar\mathbf{k}_L$, $6\hbar\mathbf{k}_L$...

L'étude expérimentale du régime de Bragg est également présentée.

L'approche théorique utilisée pour le régime de Bragg s'applique également à l'étude des « Dopplérons », qui sont des processus résonnants où l'atome passe de l'état fondamental g à l'état excité e par un nombre impair de processus d'absorption et d'émission stimulée.

Lame séparatrice magnéto-optique

On revient au régime de Raman-Nath et on décrit une proposition récente de T. Pfau, C. S. Adams et J. Mlynek conduisant à des séparations angulaires mieux définies pour les ondes diffractées obtenues après traversée de l'onde laser.

Le schéma proposé utilise un effet Zeeman et une configuration laser présentant un gradient de polarisation. L'idée essentielle est qu'une telle configuration donne naissance à des niveaux d'énergie pour l'atome habillé variant de manière triangulaire avec la position z de traversée de l'onde laser, et non pas de manière sinusoïdale. Le calcul des intensités des ondes diffractées pour un tel réseau de phase mince conduit alors à un spectre d'intensités très resserré autour de deux valeurs opposées. Un tel dispositif pourrait donc jouer le rôle d'une lame séparatrice pour ondes de de Broglie permettant d'obtenir une séparation angulaire importante et bien définie.

Effet Stern et Gerlach optique

Dans les expériences analysées plus haut, l'extension latérale du paquet d'ondes atomique incident, le long de l'onde laser, est grande devant la longueur d'onde laser λ . Une autre situation intéressante est celle d'un paquet d'ondes incident très localisé, d'extension latérale très petite devant λ . Dans certaines conditions, un tel paquet d'ondes incident peut se séparer en deux paquets d'ondes cohérents se propageant avec des vitesses opposées le long de l'onde laser. C'est l'effet Stern et Gerlach optique.

Pour ce problème également, il est utile d'introduire les niveaux d'énergie de l'atome habillé par les photons laser. Au point de traversée, on a 2 niveaux dont les énergies présentent des gradients de signes opposés le long de l'onde laser. Si l'atome est dans une superposition linéaire des deux états correspondants, les forces s'exerçant sur chacune des deux composantes du paquet d'ondes vont être de signes opposés et le paquet d'ondes incident va se séparer en deux parties. On présente en détail un tel calcul et on précise le critère de non-adiabacité qui, lorsqu'il est satisfait, entraîne que l'atome entrant dans l'onde laser ne suit pas adiabatement le niveau habillé se raccordant par continuité à l'état fondamental g en dehors de l'onde laser. C'est dans de telles conditions que l'atome peut traverser l'onde laser en étant préparé dans une superposition linéaire des deux niveaux habillés et que l'effet Stern et Gerlach optique peut alors être observé.

Une expérience récente réalisée à Constance est également décrite. Elle a permis d'observer pour la première fois l'effet Stern et Gerlach optique et de vérifier ses principales caractéristiques.

Transition entre le régime diffractif et le régime diffusif

Le cours se poursuit par la présentation d'un modèle simple élaboré dans notre laboratoire et permettant de comprendre simplement comment le mouvement d'un atome dans une onde laser est perturbé quand la durée d'interaction T devient suffisamment grande devant la durée de vie radiative τ_R de l'état excité e pour que les processus d'émission spontanée, ignorés dans ce qui précède, ne puissent plus être négligés. En l'absence d'émission spontanée, l'évolution du système atome + champ laser est purement Hamiltonienne, et la traversée de l'onde laser transforme l'onde de de Broglie incidente en une superposition d'ondes de de Broglie cohérentes entre elles : c'est le « régime diffractif ». L'autre limite, où la durée d'interaction T est suffisamment longue devant τ_R pour que de nombreux processus d'émission spontanée aient le temps de se produire, correspond à une situation où le mouvement de l'atome, analogue à un mouvement Brownien, peut être décrit en termes de force moyenne et de coefficient de diffusion de l'impulsion.

C'est le « régime diffusif ». Le problème posé est de comprendre comment on passe continûment d'un régime à l'autre quand on fait croître la durée d'interaction T .

Le modèle simple utilisé pour aborder ce problème est celui de la traversée d'une onde laser stationnaire par un atome dans le régime de Raman-Nath, aucune restriction n'étant cependant faite sur les valeurs relatives de T et τ_R . A partir des équations du mouvement, une expression analytique simple est obtenue pour le propagateur de la fonction de Wigner représentant l'état du centre de masse de l'atome. Ce propagateur $G(x, q, T)$ peut être interprété comme une « quasi-probabilité » de transfert d'impulsion $\hbar q$ pour un atome traversant l'onde stationnaire au point x . On montre alors qu'un tel propagateur permet de comprendre de manière synthétique plusieurs effets physiques étudiés généralement avec des formalismes différents : diffraction d'une onde de de Broglie et effet Stern et Gerlach optique (à la limite $T \ll \tau_R$), force moyenne et coefficient de diffusion de l'impulsion (à la limite $T \gg \tau_R$), transition du régime diffractif au régime diffusif et destruction progressive des cohérences spatiales (pour $T \sim \tau_R$), statistique du nombre de photons de fluorescence émis pendant un temps donné T (pour $T \sim \tau_R$ et $T \gg \tau_R$).

Effets d'interférence quantique pour un atome situé à un nœud d'une onde stationnaire

Un atome situé à un nœud d'une onde stationnaire ne « voit » pratiquement pas de lumière et émet donc très peu de photons de fluorescence. La théorie standard des forces radiatives prévoit cependant, dans le régime diffusif, un coefficient de diffusion de l'impulsion de l'atome, aussi important aux nœuds qu'aux ventres. On présente une approche simple, développée au laboratoire, permettant de résoudre un tel paradoxe.

L'approche suivie consiste à partir d'excitations élémentaires du mode du champ de rayonnement correspondant à l'onde laser stationnaire. Chacun des photons associés à ces excitations élémentaires est dans une superposition linéaire de deux états d'impulsions opposées. On étudie alors la diffusion d'un tel photon par un atome dont l'état est décrit par un paquet d'ondes très localisé au voisinage d'un nœud du mode correspondant à l'onde stationnaire. Une expression analytique est obtenue pour l'état du système atome + champ à l'issue du processus de diffusion. L'étude de cette expression permet alors d'interpréter physiquement la diffusion d'impulsion « anormale » comme étant due à une interférence quantique entre deux amplitudes de diffusion de photon par l'atome, l'une vers l'avant, l'autre vers l'arrière. Une telle approche permet également de comprendre l'importance des corrélations quantiques qui s'établissent entre l'atome et le champ et de montrer qu'elles sont responsables de l'apparition d'une redistribution de photons entre les

deux ondes progressives formant l'onde stationnaire, corrélée avec l'impulsion atomique. C'est une telle redistribution qui est responsable de la diffusion d'impulsion atomique, et non pas la diffusion des photons incidents vers les modes initialement vides du champ de rayonnement.

Effets Aharonov-Bohm scalaire et vectoriel
Généralisations à des particules neutres

En 1959, Aharonov et Bohm ont proposé des expériences d'interférométrie sur des ondes de de Broglie électroniques, démontrant l'importance du rôle joué par les potentiels scalaire et vecteur en mécanique quantique. Dans ces schémas expérimentaux, l'électron traverse des régions de l'espace où les champs électrique et magnétique sont rigoureusement nuls, alors que les potentiels scalaire et vecteur ne le sont pas. Aharonov et Bohm montrent alors que ces potentiels peuvent donner naissance à un déphasage entre les fonctions d'onde se propageant dans les deux bras de l'interféromètre, déphasage qui se traduit par un déplacement des franges d'interférence. Ce déphasage est de nature topologique : il ne dépend pas de la forme exacte des chemins suivis dans les deux bras de l'interféromètre. Il est également indépendant de la vitesse des particules. Le cours 1993-1994 se termine par une présentation des effets Aharonov-Bohm scalaire et vectoriel et par une discussion des possibilités de généraliser de tels effets à des particules neutres comme des neutrons ou des atomes.

Dans l'effet Aharonov-Bohm scalaire, l'électron traverse, dans les deux bras de l'interféromètre, des cylindres creux equipotentiels entre lesquels on applique une différence de potentiel V pendant un certain intervalle de temps T au cours duquel les paquets d'ondes électroniques sont entièrement contenus à l'intérieur des cylindres. L'électron ne « voit » alors aucun champ électrique et n'est soumis à aucune force électrique pendant toute la durée de l'expérience. Il apparaît cependant un déphasage Φ entre les deux bras égal à $-qVT/\hbar$ où q est la charge de l'électron. On présente un argument de Furry et Ramsey montrant qu'un tel déphasage est essentiel pour préserver la cohérence interne de la mécanique quantique. Sans un tel déphasage, il serait en effet possible de déterminer par quel chemin l'électron passe (en mesurant par exemple la charge induite sur un cylindre par le passage à l'intérieur d'une particule chargée), sans perturber le système de franges observables à la sortie de l'interféromètre.

L'effet Aharonov-Bohm scalaire, tel qu'il a été proposé en 1959, n'a pas été encore observé. Récemment, de nouvelles expériences, généralisant un tel effet à des particules neutres, ont été réalisées. Ces expériences, effectuées sur des neutrons et des atomes d'hydrogène, sont passées en revue et décrites. Elles diffèrent de l'effet Aharonov-Bohm scalaire original dans la mesure où

la particule se propage dans des régions où les champs sont non nuls, et pas seulement les potentiels. Par contre, elles partagent avec l'effet Aharonov-Bohm scalaire un certain nombre de propriétés importantes qui ont motivé leur réalisation : absence de force agissant sur le centre de masse de la particule, insensibilité du déphasage à la vitesse de la particule, et par suite possibilité d'observer des franges même si la différence de marche associée au déphasage Aharonov-Bohm est supérieure à la longueur de cohérence des paquets d'ondes.

Dans l'effet Aharonov-Bohm vectoriel, les deux bras de l'interféromètre à électron enferment un solénoïde très long alimenté par un courant. Le champ magnétique \mathbf{B} n'est non nul qu'à l'intérieur du solénoïde et aucune force magnétique ne s'exerce donc sur l'électron qui évolue à l'extérieur du solénoïde. Le potentiel vecteur est cependant non nul dans cette région et il fait apparaître un déphasage Φ entre les deux bras de l'interféromètre égal à qF/\hbar où F est le flux du champ \mathbf{B} à travers la surface enfermée entre ces deux bras.

Un effet analogue au précédent a été proposé pour des particules neutres par Aharonov, Anandan et Casher. Il concerne des particules neutres possédant un moment magnétique μ et évoluant dans un champ électrique statique \mathbf{E} dont la configuration est telle qu'aucune force électrique ne s'exerce sur le centre de masse de la particule. Un certain nombre de résultats concernant la dynamique d'un moment magnétique dans un champ électrique sont établis et discutés physiquement. Ils permettent de préciser les caractéristiques importantes de l'effet Aharonov-Anandan-Casher et de souligner les analogies et différences entre un tel effet et l'effet Aharonov-Bohm vectoriel. Des expériences récentes, ayant permis d'observer un tel effet sur des neutrons et des molécules TIF, sont également passées en revue.

COURS À L'UNIVERSITÉ DE CONSTANCE

Dans le cadre de la Chaire de Physique Atomique et Moléculaire, quatre cours ont été donnés à l'Université de Constance (Allemagne), sur le thème général « Etude du mouvement d'un atome dans un champ laser ».

Le premier cours introduit les notions de base permettant de comprendre les forces radiatives qui s'exercent sur un atome à deux niveaux évoluant dans une onde laser. On montre qu'il existe deux types de forces, une force dissipative et une force réactive, liées respectivement à l'élargissement et au déplacement des niveaux atomiques produits par l'interaction atome-laser. Diverses applications de ces forces sont passées en revue : refroidissement Doppler, pièges et miroirs pour atomes neutres, cavités gravitationnelles pour

atomes neutres, effet Sisyphé à haute intensité et canalisation d'atomes dans une onde stationnaire laser intense.

Le deuxième cours généralise l'étude précédente à des atomes possédant plusieurs sous-niveaux Zeeman dans l'état fondamental. Des mécanismes de refroidissement nouveaux, comme le refroidissement Sisyphé à basse intensité, sont présentés et interprétés en termes de pompage optique et de déplacements lumineux. On montre qu'ils peuvent conduire à une quantification du mouvement de l'atome dans les puits de potentiel optique créés par le champ laser et on décrit des observations expérimentales récentes de tels effets, ainsi que des structures spatiales ordonnées d'atomes auxquels ils donnent naissance (« réseaux optiques » d'atomes).

Le troisième cours est consacré à l'étude des effets physiques qui peuvent être observés lorsque l'atome est préparé dans une superposition linéaire de sous-niveaux Zeeman. Deux effets sont plus particulièrement étudiés. Tout d'abord, l'effet Hanle dans les états atomiques fondamentaux qui permet, dans certaines conditions, de détecter des champs magnétiques très faibles de l'ordre de quelque 10^{-10} Gauss. Une expérience récente, permettant de détecter l'effet Hanle par une modification des trajectoires atomiques, est également décrite. Le deuxième effet étudié est l'effet de « piégeage cohérent de populations » apparaissant pour certaines configurations de niveaux atomiques. On interprète un tel effet dans le point de vue de l'atome habillé par les photons laser et on montre comment une interférence quantique destructive entre deux amplitudes d'absorption bloque l'absorption de photons par l'atome et interrompt la cascade radiative de l'atome habillé.

Le quatrième cours montre enfin comment l'effet de piégeage cohérent de population étudié dans le troisième cours peut être rendu sélectif en vitesse et être utilisé pour refroidir des atomes au-dessous de la limite correspondant à l'énergie cinétique de recul d'un atome absorbant ou émettant un seul photon (refroidissement sub-recul). Des expériences récentes réalisées dans notre laboratoire et ayant permis d'observer, à une et deux dimensions, des températures de l'ordre de 200 nanoKelvins, près de 20 fois inférieures à la limite de recul, sont décrites. On présente également des approches théoriques nouvelles de ces phénomènes (simulations Monte-Carlo quantiques, lien avec les « vols de Lévy »), en insistant sur les idées physiques nouvelles suggérées par de telles approches.

C. C.-T.

SÉMINAIRES 1993-1994

Les séminaires donnés au Collège de France ont été consacrés à la présentation et à la discussion d'un certain nombre de développements récents en physique atomique et moléculaire et en optique quantique.

Neuf séminaires ont été organisés :

T. YABUZAKI (Kyoto University, Kyoto), *Laser spectroscopy and optical pumping of alkali atoms in superfluid helium*.

C. FABRE (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS, Paris), *Le laser superradiant*.

R. GLAUBER (Harvard University, Cambridge, USA), *Quantum mechanical behaviour of trapped ions*.

J.-Y. COURTOIS (Institut d'Optique, Orsay), *Résonances induites par le recul — Un équivalent atomique au laser à électrons libres*.

R. KAISER (Institut d'Optique, Orsay), *Ondes évanescentes exaltées pour miroirs à atomes*.

A. BOUQUET (Laboratoire de Physique Théorique, Université Paris 7), *Les problèmes de la matière noire. Derniers développements*.

A. STEANE (Oxford University et Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *A gravitational cavity for atoms*.

V. LORENT (Laboratoire de Physique des Lasers, Université Paris-Nord, Villetaneuse), *Résonances multiphotoniques dans la réflexion d'atomes par une onde de surface*.

E. RIIS (Department of Physics and Applied Physics, University of Strathclyde, Glasgow), *The Aharonov-Casher effect in an atomic system*.

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUJJI effectue ses recherches au sein du Laboratoire Kastler Brossel de l'École Normale Supérieure. Il y dirige avec l'aide de M. Alain MICHAUD, Sous-Directeur de Laboratoire au Collège de France, les travaux d'une équipe de chercheurs sur le thème général des interactions matière-rayonnement et du refroidissement et piégeage d'atomes par des faisceaux laser.

Ce laboratoire, qui est associé au C.N.R.S., à l'École Normale Supérieure et à l'Université Paris VI, est implanté géographiquement, d'une part au

Département de Physique de l'Ecole Normale Supérieure (24 rue Lhomond), d'autre part à l'Université Paris VI (Place Jussieu). Il est dirigé depuis le 1^{er} janvier 1994 par M^{me} Michèle LEDUC, Directeur de Recherche au C.N.R.S.

Le personnel du Laboratoire comporte : 11 enseignants-chercheurs (professeurs, maître de conférences, agrégés-préparateurs), 25 chercheurs au C.N.R.S. (directeurs, et chargés de recherche), 27 chercheurs étrangers, 29 élèves de grandes écoles et thésitifs, 21 techniciens et administratifs.

Le Laboratoire est constitué d'une dizaine d'équipes de recherches, comprenant 3 à 10 chercheurs, et étudiant divers problèmes de physique atomique et moléculaire et d'optique quantique.

Un rapport d'activité scientifique est rédigé tous les deux ans pour le Comité National du C.N.R.S. Il contient une analyse détaillée des problèmes scientifiques abordés par chaque équipe et un bilan des résultats nouveaux obtenus. Nous nous contenterons donc ici de donner la liste des publications du Laboratoire en 1993, ainsi que celles des thèses soutenues au cours de cette même année.

PUBLICATIONS

COHEN-TANNOUJDI C., *Quantum phenomena in atomic cooling*, in *Atomic Physics 13*, p. 101-117, ed. by H. Walther, T. W. Hänsch and B. Neizert, (AIP, 1993).

AMINOFF C.G., BOUYER Ph., DESBIOLLES P., *Multiple reflection of cold cesium atoms on a parabolic electromagnetic mirror* (C.R. Acad. Sci., 316, p. 1535-1541, 1993).

LOUNIS B., REICHEL J., SALOMON C., *Laser cooling of atoms in microgravity* (C.R. Acad. Sci., 316, p. 739-744, 1993).

COLLOT L., LEFEVRE-SEGUIN V., BRUNE M., RAIMOND J.M., HAROCHE S., *Very High-Q Whispering-Gallery Mode Resonances observed on Fused Silica Microspheres* (Europhys. Lett., 23, p. 327-334, 1993).

LOUNIS B., VERKERK P., COURTOIS J.-Y., SALOMON C., GRYNBERG G., *Quantized atomic motion in 1D cesium molasses with magnetic field* (Europhys. Lett., 21, p. 13, 1993).

BERG-SØRENSEN K., CASTIN Y., MØLMER K., DALIBARD J., *Cooling and Tunnelling of Atoms in a 2D Laser Field* (Europhys. Lett., 22, p. 663-668, 1993).

ZALICKI P., BILLY N., GOUEDARD G., VIGUE J., *Terminal rovibrational distribution of Na₂ in a sodium supersonic beam* (*J. Chem. Phys.*, 99, p. 6436-6448, 1993).

EMILE O., KAISER R., GERZ C., WALLIS H., ASPECT A., COHEN-TANNOUJJI C., *Magnetically assisted Sisyphus effect* (*J. Physique, II*, 3, p. 1709-1733, 1993).

COHEN-TANNOUJJI C., ZAMBON B., ARIMONDO E., *Quantum-jump approach to dissipative processes : application to amplification without inversion* (*J.O.S.A., B*, 10, p. 2107-2120, 1993).

MØLMEER K., CASTIN Y., DALIBARD J., *Monte Carlo wave-function method in quantum optics* (*J.O.S.A., B*, 10, p. 524-538, 1993).

ZALICKI P., BILLY N., GOUEDARD G., VIGUE J., *Coherent saturation effects in a Na₂ laser-induced fluorescence experiment : theory and experiment* (*Mol. Phys.*, 79, p. 899-909, 1993).

LOUNIS B., VERKERK P., SALOMON C., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Optical phase-conjugation in Caesium optical molasses* (*Nonlinear Optics*, 5, p. 459-467, 1993).

WEIDEMULLER M., GABBANINI C., HARE J., GROSS M., HAROCHE S., *A beam of laser-cooled lithium Rydberg atoms for precision microwave spectroscopy* (*Opt. Commun.*, 101, p. 342-346, 1993).

BOUCHIAT M.A., GUENA J., JACQUIER Ph., LINTZ M., *Demonstration and interpretation of the radial electric field generated in a Cs vapor by laser photoionization and charge separation in an external axial E-field* (*Opt. Commun.*, 104, p. 157-164, 1993).

GRYNBERG G., COHEN-TANNOUJJI C., *Central resonance of the Mollow absorption spectrum — Physical origin of gain without population inversion* (*Optics Commun.*, 96, p. 150-163, 1993).

NUSSENZVEIG P., BERNARDOT F., BRUNE M., HARE J., RAIMOND J.M., HAROCHE S., GAWLIK W., *Preparation of high-principal-quantum-number « circular » states of rubidium* (*Phys. Rev., A*, 48, p. 3991, 1993).

GRYNBERG G., LOUNIS B., VERKERK P., COURTOIS J.-Y., SALOMON C., *Quantized motion of cold cesium atoms in two and three dimensional optical potentials* (*Phys. Rev. Lett.*, 70, p. 2249-2252, 1993).

DAVIDOVICH L., MAALI A., BRUNE M., RAIMOND J.M., HAROCHE S., *Quantum Switches and Nonlocal Microwave Fields* (*Phys. Rev. Lett.*, 71, p. 2360-2363, 1993).

AMINOFF C.G., STEANE A.M., BOUYER P., DESBIOLLES P., DALIBARD J., COHEN-TANNOUJJI C., *Cesium Atoms Bouncing in a Stable Gravitational Cavity* (*Phys. Rev. Lett.*, 71, p. 3083-3086, 1993).

CHENG E., COLE M.W., DUPONT-ROC J., SAAM W.F., TREINER J., *Novel wetting behavior in quantum films* (RMP Colloquia - avril 93) (*Review of Modern Physics*, 65, p. 557-580, 1993).

DESBIOLLES P., DALIBARD J., *Une cavité gravitationnelle pour atomes* (*Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 1993).

BOUCHIAT M.A., BOUCHIAT C., GUENA J., JACQUIER Ph., LINTZ M., *Theory of transition probability saturation for photodissociation of Cs₂ and photoionization of the 5D_{3/2} product atoms : absolute cross-section determination* (*Z. Phys. D*, 25, p. 145-152, 1993).

BOUCHIAT C., BOUCHIAT M.A., GUENA J., JACQUIER Ph., LINTZ M., *Transition probability saturation theory for two-photon ionization of Cs₂ around 540 nm : polarization splitting of the saturation curve* (*Z. Phys., D*, 27, p. 333-342, 1993).

GLASS-MAUJEAN M., DELANDE D., *J.C. Gay* (*Comments At. Mol. Phys.*, 29, p. 1-4, 1993).

NEZ F., PLIMMER M.D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., DE NATALE P., *First pure frequency measurement of an optical transition in atomic hydrogen : better determination of the Rydberg constant* (*Europhys. Lett.*, 24, p. 635, 1993).

GLASS-MAUJEAN M., BESWICK J.A., *Propriétés scalaires et vectorielles dans les processus de photofragmentation moléculaire* [*J. Chem. Phys.*, Projet Soleil : argumentation scientifique, ed. D. Chandrésis, P. Morin et I. Nenner (ed. de Physique Paris, 1993)].

GRYNBERG G., *Roll and hexagonal patterns in a phase contrast oscillator* [*J. Phys.*, III (France), 3, 1345-1350, 1993].

HALLEY M., DELANDE D., TAYLOR K.T., *The combination of R-matrix and complex coordinate methods : application to the diamagnetic spectrum of Sr and Ba* (*J. Phys.*, B, 26, p. 1775, 1993).

WINTGEN D., DELANDE D., *Double photoexcitation of 1p0 states in helium* (*J. Phys.*, B, 26, p. L399, 1993).

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Quantum Langevin equations and stability* (*J. Physique*, I, 3, p. 339-352, 1993).

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Quantum fluctuations of position of a mirror in vacuum* (*J. Physique*, I-3, p. 1-20, 1993).

MERTZ J., HEIDMANN A., *Photon noise reduction by controlled deletion techniques* (*J.O.S.A.*, B, 1993).

DEBUISSCHERT T., SIZMANN A., GIACOBINO E., FABRE C., *Type II c.w. optical parametric oscillators : oscillation and frequency tuning characteristics, special issue on optical parametric oscillation* (*J. Opt. Soc. Am.*, B10, 1668, 1993, *J.O.S.A.*, B, 1993).

BLOUIN A., MAITRE A., PINARD M., RIOS-LEITE J., BOYD R.W., COURTOIS J.Y., GRYNBERG G., *Counterpropagating beams in a nonlinear medium : Pattern formation and temporal chaos (Nonlinear Optics, 5, p. 459-477, 1993).*

LOUNIS B., VERKERK P., SALOMON C., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Optical phase conjugation in cesium optical molasses (Nonlinear Optics, 5, p. 459-467, 1993).*

GRYNBERG G., LUGIATO L.A., *Quantum properties of hexagonal patterns (Optics Commun., 101, p. 69-73, 1993).*

NEZ F., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., *Optical frequency determination of the hyperfine components of the $5S\ 1/2 - 5D\ 3/2$ two photon transitions in rubidium (Optics Commun., 102, p. 432, 1993).*

VALLET M., PINARD J., GRYNBERG G., ABRAM I., *Scale factor and optical bias in a ring fourwave mixing gyro (Optics Commun., 99, p. 225-229, 1993).*

BOURZEIX S., PLIMMER M.D., NEZ F., JULIEN L., BIRABEN F., *Efficient frequency doubling of a continuous wave titanium-sapphire laser in an external enhancement cavity (Optics Commun., 99, p. 89, 1993).*

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Friction and inertia for a mirror in a thermal field (Phys. Lett., A, 172, p. 319-324, 1993).*

REYNAUD S., JAEKEL M.T., *Quantum fluctuations of mass for a mirror in vacuum (Phys. Lett., A, 180, p. 9-14, 1993).*

KOLOBOV M.I., GIACOBINO E., FABRE C., DAVIDOVICH L., *Role of pump statistics and dynamics of atomic polarization in quantum fluctuations of laser sources (Phys. Rev. A, 47, p. 1431, 1993).*

MAIA NETO, REYNAUD S., *Dissipative force on sphere moving in vacuum (Phys. Rev., A, 47, p. 1639-1646, 1993).*

ZAKRZEWSKI J., DELANDE D., GAY J.C., RZAZEWSKI K., *Ionization of highly excited hydrogen atoms by circularly polarized microwave field (Phys. Rev., A, 47, p. R2468, 1993).*

COURTOIS J.Y., GRYNBERG G., *Probe transmission in one-dimensional optical molasses : theory for circularly cross-polarized cooling beams (Phys. Rev., A, 48, p. 1378-1399, 1993).*

ZAKRZEWSKI J., DELANDE D., *Parametric motion of energy levels in quantum chaotic systems : I. Curvature Distribution 3 (Phys. Rev., E, 47, p. 1650, 1993).*

ZAKRZEWSKI J., DELANDE D., KUS M., *Parametric motion of energy levels in quantum chaotic systems : II. Avoided Crossing Distributions (Phys. Rev., E, 47, p. 1665, 1993).*

BUCHLEITNER A., DELANDE D., *Dynamical localization in more than one dimension (Phys. Rev. Lett., 70, p. 33, 1993).*

HAAKE F., KOLOBOV M.I., FABRE C., GIACOBINO E., REYNAUD S., *A Superradiant Laser* (*Phys. Rev. Lett.*, 71, p. 995, 1993).

KUS M., HAAKE F., DELANDE D., *Prebifurcation periodic ghost orbits in semiclassical quantization* (*Phys. Rev. Lett.*, 71, p. 2167, 1993).

BUCHLEITNER A., DELANDE D., *Quantum dynamics of circular Rydberg state in a microwave field* (*Phys. Rev. Lett.*, 71, p. 3633, 1993).

HILICO L., COURTY J.M., LAMBRECHT A., FABRE C., GIACOBINO E., *Atomes froids en cavité : bistabilité optique et bruit quantique* (*Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 1993).

THÈSES

O. EMILE, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1993, *Manipulation d'atomes d'hélium métastable par laser : effet Sisyphe magnétique* (12 février 1993).

B. LOUNIS, Thèse de Doctorat de l'Université Paris XI-Orsay, 1993, *Atomes refroidis par laser : de la mélasse au cristal optique* (5 mars 1993).

J.-Y. COURTOIS, Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique, 1993, *Spectroscopie Raman et Rayleigh stimulée d'atomes refroidis par laser — Dynamique des Mélasses Optiques Unidimensionnelles* (14 mai 1993).

F. NEZ, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1993, *Chaîne de Fréquence optique pour mesurer les transitions 2S-8S/8D dans l'atome d'hydrogène ; mesure de la constante de Rydberg en unité de Fréquence* (27 octobre 1993).

ACTIVITÉS DIVERSES - MISSIONS - CONFÉRENCES

Conférences invitées à des Conférences Internationales

— 13^{es} rencontres de Moriond sur « Perspectives in Neutrinos, Atomic Physics and Gravitation », Villard-sur-Ollon, Suisse, février 1993.

— Symposium Franco-Américain sur « Laser-Matter Interaction », Ann Arbor, Michigan (USA), avril 1993.

— CLEO/IQEC 93 (Conference on Lasers and Electro-optics/International Quantum Electronics Conference), Baltimore, Maryland (USA), mai 1993.

— ELICOL'S 93 (International Conference on Laser Spectroscopy), Hot Springs, Virginia (USA), juin 1993.

— Colloque international « Le Message », Université de Bordeaux - Institut Weizmann, Bordeaux, France, juillet 1993.

— General Conference of the European Physical Society, EPS 9 - Trends in Physics, Florence, Italie, septembre 1993 (Conférence plénière).

— European Research Conference on Quantum Optics, Davos, Suisse, septembre 1993.

— Australian Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy, Melbourne, Australie, décembre 1993 (Geoffrey Frew Lecture of the Australian Academy of Sciences).

Séminaires

— Grenoble, France, janvier 1993.

— Florence, Naples, Italie, février 1993.

— Villetaneuse, France, mars 1993.

— Chicago, Illinois, USA, avril 1993.

— Canberra, Adelaïde, Melbourne, Brisbane, Sydney, Australie, décembre 1993.

— Auckland, Nouvelle-Zélande, décembre 1993.

Distinctions

Charles Hard Townes Award of the Optical Society of America, mai 1993.

Frew Fellow of the Australian Academy of Sciences, décembre 1993.