

## Physique atomique et moléculaire

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

Le cours de l'année 1992-1993 est le premier d'une série de deux cours consacrés à l'interférométrie atomique. Il s'agit là d'un nouveau domaine de recherche, en développement très rapide, qui porte sur l'étude de phénomènes physiques où la nature ondulatoire des degrés de liberté de translation d'un atome neutre joue un rôle important. On peut ainsi observer des phénomènes d'interférence, analogues à ceux qui sont bien connus pour la lumière, et où les ondes lumineuses sont remplacées par les ondes de de Broglie associées au centre de masse de l'atome.

Le cours commence par une introduction générale où sont analysés les développements récents ayant permis l'éclosion d'un sujet : nouvelle maîtrise du mouvement atomique acquise grâce aux méthodes de refroidissement et de piégeage d'atomes par des faisceaux laser ; naissance d'une « optique atomique » utilisant des nouveaux dispositifs jouant vis-à-vis des ondes de Broglie atomiques un rôle équivalent à celui des miroirs, lames séparatrices, lentilles... en optique traditionnelle ; meilleure compréhension théorique des méthodes de spectroscopie à haute résolution sans effet Doppler... Une comparaison est également effectuée entre l'interférométrie atomique et d'autres types d'interférométrie utilisant des photons ou des neutrons au lieu d'atomes. Enfin, quelques remarques générales sont formulées à propos des phénomènes d'interférence quantique, concernant par exemple la nature des objets qui interfèrent ou la possibilité de déterminer par quel « chemin » le système passe.

### *Exemple simple de lame séparatrice pour atomes*

Considérons un atome à deux niveaux internes  $a$  et  $b$  (avec  $E_b > E_a$ ), et supposons que cet atome, initialement dans l'état  $a$ , avec une impulsion  $\mathbf{p}$ , traverse une onde laser quasi-résonnante de largeur  $w$  et de vecteur d'onde  $\mathbf{k}$ .

L'atome peut absorber un photon laser et passer dans l'état excité  $b$ , l'impulsion  $\mathbf{p}$  de l'atome augmentant d'une quantité  $\hbar\mathbf{k}$  égale à l'impulsion du photon absorbé. La résolution de l'équation de Schrödinger associée à un tel problème montre que, à l'issue de la traversée de l'onde laser, l'atome est en général dans une superposition linéaire des états  $|a, \mathbf{p}\rangle$  et  $|b, \mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}\rangle$ . On obtient donc ainsi une superposition linéaire de deux ondes de de Broglie, différant non seulement par leur directions de propagation, respectivement parallèles à  $\mathbf{p}$  et  $\mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}$ , mais également par l'état interne,  $a$  ou  $b$ , dans lequel se trouve l'atome. Un tel dispositif peut être considéré comme une lame séparatrice pour ondes de de Broglie atomiques.

Le calcul précédent peut être aisément généralisé au cas où l'atome traverse successivement deux ondes laser de même vecteur d'onde  $\mathbf{k}$ , de même largeur  $w$ , séparées par une certaine distance  $L$ . Partant de l'état  $|a, \mathbf{p}\rangle$ , l'atome peut se retrouver, à l'issue de la traversée des deux ondes, dans l'état  $|b, \mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}\rangle$  en ayant suivi deux chemins différents  $|a, \mathbf{p}\rangle \rightarrow |b, \mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}\rangle$  et  $|a, \mathbf{p}\rangle \rightarrow |a, \mathbf{p}\rangle \rightarrow |b, \mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}\rangle$ , chaque flèche symbolisant la traversée d'une onde. Les amplitudes associées à ces deux chemins interfèrent et on trouve que la probabilité  $P(a \rightarrow b)$  de changer d'état interne varie de manière sinusoidale en fonction de l'écart à résonance  $\delta = \omega_L - \omega_A$  entre la fréquence des ondes laser  $\omega_L$  et la fréquence atomique  $\omega_A = (E_b - E_a)/\hbar$ . Les oscillations correspondantes, appelées « franges de Ramsey », ont une période en  $\delta$  égale à  $2\pi/T$ , où  $T$  est le temps de vol de l'atome d'une onde à l'autre. Un tel résultat est valable pour une valeur donnée de la projection de la vitesse des atomes le long des ondes laser, c'est-à-dire encore pour une valeur donnée du déplacement Doppler  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{p}/M$ . On montre que la moyenne sur  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$ , liée à la dispersion des vitesses des atomes incidents, brouille en général les franges de Ramsey. Un tel brouillage est dû au fait que le déphasage entre les deux perturbations « vues » par l'atome lors des deux traversées varie de manière importante d'un atome à l'autre. Plusieurs méthodes permettant d'éviter un tel brouillage et utilisant des ondes stationnaires ou des réseaux de fentes sont passées en revue et interprétées physiquement.

### *Echos de photons, franges de Ramsey et interférométrie atomique*

Le cours se poursuit par l'analyse d'un certain nombre d'expériences où un atome traverse successivement plusieurs ondes laser progressives et où le signal intéressant ne s'annule pas lors de la moyenne sur les vitesses atomiques.

Un premier phénomène étudié est celui « d'écho de photons » à deux ondes progressives. Les atomes traversent deux ondes progressives parallèles séparées par une distance  $L$  et on montre qu'une onde de densité de polarisation atomique, de même vecteur d'onde  $\mathbf{k}$  que les deux ondes laser, apparaît dans l'espace à une distance  $L$  de la deuxième onde laser.

La deuxième expérience analysée utilise deux paires d'ondes progressives se propageant en sens opposés, configuration proposée pour la première fois par Christian Bordé. Le calcul des probabilités de changement d'état interne  $P(a \rightarrow b)$  fait apparaître des franges de Ramsey qui ne se brouillent pas lors de la moyenne sur les vitesses atomiques.

Chacune de ces deux expériences est interprétée physiquement comme une expérience d'interférométrie atomique dans laquelle un paquet d'ondes incident est séparé en deux paquets d'ondes cohérents dont les centres suivent des trajectoires différentes et qui finissent par se recombiner à l'issue de la traversée des ondes laser. On montre ainsi qu'il existe un lien intéressant entre certaines expériences de spectroscopie laser à haute résolution sans effet Doppler et l'interférométrie atomique.

### *Fonctions d'onde, propagateurs et intégrales de chemin*

Dans un interféromètre atomique, l'amplitude de probabilité de trouver la particule en un point donné  $\mathbf{r}$  et à un instant donné  $t$ , à la sortie de l'interféromètre, est une somme de deux amplitudes  $A_I$  et  $A_{II}$  correspondant aux deux chemins possibles suivis par l'atome dans l'interféromètre. Pour interpréter les signaux expérimentaux, il faut donc calculer  $A_I$  et  $A_{II}$ , et en particulier le déphasage entre ces deux amplitudes produit par des champs extérieurs ou inertiels. On peut en particulier se demander s'il est possible de ramener un tel calcul de fonctions d'ondes quantiques à des intégrales le long de chemins classiques.

Une démarche commode consiste alors à considérer le propagateur quantique  $K(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a)$ , représentant l'amplitude de probabilité pour que la particule partant de  $\mathbf{r}_a$  à l'instant  $t_a$  arrive en  $\mathbf{r}_b$  à l'instant  $t_b$ . L'approche de Feynman, exprimant un tel propagateur comme une intégrale fonctionnelle sur tous les chemins possibles, est rappelée. Une telle approche utilise le Lagrangien et l'action et se prête particulièrement bien à l'étude de la limite classique. On montre qu'une telle formulation de la mécanique quantique ressemble à un principe de Fresnel-Huygens dans l'espace-temps qui permet d'exprimer la fonction d'onde en  $\mathbf{r}_b t_b$  sous la forme d'une superposition d'ondelettes rayonnées aux divers points  $\mathbf{r}_a$  à l'instant  $t_a$ . Le lien entre une telle approche et la formulation traditionnelle de la mécanique quantique est également explicité.

La formulation de Feynman se prête particulièrement bien aux situations où le Lagrangien est une fonction quadratique des coordonnées et des vitesses, ce qui est le cas pour un atome placé dans un champ de pesanteur ou dans un référentiel en rotation. On montre alors que :

$$K(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a) = F(t_b, t_a) \exp \frac{i}{\hbar} S_{cl}(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a) \quad (1)$$

où  $F(t_b, t_a)$  est une fonction ne dépendant que de  $t_a$  et  $t_b$  et où  $S_{cl}(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a)$  est l'action classique évaluée le long du chemin classique réel reliant  $\mathbf{r}_a t_a$  à  $\mathbf{r}_b t_b$ . C'est un tel résultat qui permettra par la suite de relier le déphasage à la sortie de l'interféromètre à des intégrales le long de chemins classiques.

### *Propagation d'une particule dans un champ de pesanteur*

Un premier exemple important d'application de la formulation de Feynman est analysé en détail, celui de la détermination de la fonction d'onde d'une particule évoluant dans un champ de pesanteur. L'action classique  $S_{cl}(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a)$  est calculée à partir du Lagrangien classique. Le lien avec la formulation traditionnelle permet d'obtenir simplement la fonction  $F(t_b, t_a)$  qui figure dans l'équation (1) (et qui ne dépend que de  $T = t_b - t_a$ ). On montre également qu'il est possible de construire une transformation unitaire décrivant le passage dans un référentiel en chute libre et d'éliminer ainsi le champ de pesanteur des équations quantiques du mouvement, ce qui constitue une expression du principe d'équivalence. On montre enfin que, lorsque l'état initial de particule est, à l'instant  $t_a$ , une onde plane de vecteur d'onde  $\mathbf{k}$ , sa fonction d'onde au point  $\mathbf{r}_b$  à l'instant  $t_b$  se déduit de celle au point  $\mathbf{r}_a$  et à l'instant  $t_a$  par un simple facteur de phase,  $\exp \frac{i}{\hbar} S_{cl}(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a)$ , les deux points d'espace-temps  $\mathbf{r}_a t_a$  et  $\mathbf{r}_b t_b$  étant reliés par une trajectoire classique réelle d'impulsion  $\hbar \mathbf{k}$  en  $\mathbf{r}_a t_a$  et  $S_{cl}(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a)$  étant l'action classique, en présence du champ de pesanteur, calculée le long de ce chemin. Lorsque l'énergie potentielle  $Mgz$  de la particule de masse  $M$  dans le champ de pesanteur  $g$  est une petite perturbation, le résultat précédent peut prendre une forme encore plus simple. A l'ordre 1 en  $g$ , on peut alors se contenter d'utiliser les trajectoires classiques libres, calculées pour  $g = 0$  et qui réduisent à des droites. Le déphasage supplémentaire dû au champ de gravitation se réduit alors à  $\exp \left\{ - \frac{i}{\hbar} \oint Mgz(t) dt \right\}$  l'intégrale étant calculée le long des trajectoires classiques libres.

Les résultats précédents sont appliqués à l'interprétation de l'expérience de Colella, Overhauser et Werner qui est la première expérience d'interférence entre ondes de matière (en l'occurrence, des neutrons) mettant en évidence des effets quantiques sensibles au champ de pesanteur, c'est-à-dire dépendant à la fois de  $\hbar$  et  $g$ . Le déphasage entre les ondes de de Broglie associées au neutron et se propageant dans les deux bras d'un interféromètre situés à des hauteurs différentes est calculé en fonction de  $\hbar$ ,  $g$ ,  $M$  et des divers paramètres de l'expérience (surface  $S$  enfermée entre les deux bras de l'interféromètre, longueur d'onde de de Broglie  $\lambda_0$  des neutrons incidents, angle  $\varphi$  entre la verticale et la normale au plan de l'interféromètre). L'ordre de grandeur du déphasage que l'on obtiendrait en remplaçant les neutrons par des photons est

également évalué, ce qui permet de montrer à quel point les effets gravitationnels sont plus faciles à détecter sur des ondes de matière que sur des ondes lumineuses.

Une autre expérience, beaucoup plus récente, réalisée à Stanford par Kasevich et Chu est ensuite analysée. Les ondes de de Broglie qui interfèrent sont alors associées à des atomes de sodium et non à des neutrons. Cette expérience utilise des transitions Raman stimulées entre les deux niveaux hyperfins de l'atome de sodium, pour séparer un paquet d'ondes en deux composantes cohérentes entre elles, puis pour les recombinaison. Entre l'instant de séparation et l'instant de recombinaison, les centres des 2 paquets d'ondes se propagent à des hauteurs différentes, ce qui est à l'origine du déphasage gravitationnel qui apparaît entre eux. Après des rappels théoriques sur les transitions Raman stimulées et une discussion des avantages qu'elles offrent et qui sont essentiellement liés au fait que les deux niveaux internes atomiques qu'elles relient peuvent avoir une durée de vie très longue, on décrit les grandes lignes de l'expérience et on calcule le déphasage gravitationnel entre les deux paquets d'ondes. Deux méthodes de calcul sont présentées, l'une sans aucune approximation, l'autre à l'ordre de 1 en  $g$ . Les résultats obtenus sont discutés et la sensibilité de l'expérience pour des mesures de variations de  $g$  est évaluée.

#### *Propagation d'une particule dans un référentiel tournant*

Un autre exemple important d'application de l'interférométrie atomique est celui de la mesure des champs inertiels qui apparaissent dans un référentiel en mouvement de rotation par rapport à un référentiel galiléen. Il s'agit en quelque sorte de la généralisation à des ondes de matière de l'effet Sagnac bien connu pour des ondes lumineuses.

Comme l'expression du Lagrangien de la particule dans le référentiel tournant à la fréquence angulaire  $\Omega$  est une fonction quadratique de la position  $\mathbf{r}$  de la particule et de sa vitesse  $\dot{\mathbf{r}}$ , la formulation de Feynman est particulièrement commode pour analyser un tel problème et l'expression (1) du propagateur quantique demeure valable. Comme dans le cas du champ de pesanteur, on peut montrer que, lorsque l'état initial de la particule est, à l'instant  $t_a$ , une onde plane de vecteur d'onde  $\mathbf{k}$ , sa fonction d'onde au point  $\mathbf{r}_b$  à l'instant  $t_b$  se déduit de celle au point  $\mathbf{r}_a$  et à l'instant  $t_a$  par un simple facteur de phase  $\exp \frac{i}{\hbar} S_{cl}(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a)$ , les deux points d'espace temps  $\mathbf{r}_a t_a$  et  $\mathbf{r}_b t_b$  étant reliés par la trajectoire classique réelle d'impulsion  $\hbar \mathbf{k}_a$  en  $\mathbf{r}_a t_a$  (calculée dans le référentiel tournant avec  $\Omega \neq 0$ ) et  $S_{cl}(\mathbf{r}_b t_b, \mathbf{r}_a t_a)$  étant l'action classique évaluée le long de ce chemin. Là encore, il est possible de simplifier le résultat obtenu lorsqu'on se limite à l'ordre de 1 en  $\Omega$ . Le déphasage peut alors être évalué en ne considérant que les trajectoires libres, correspondant à

$\Omega = 0$ , et se réduit à  $\exp \frac{i}{\hbar} \{ M\Omega \cdot \oint dt \mathbf{r}(t) \times \dot{\mathbf{r}}(t) \}$ , l'intégrale étant calculée le long des trajectoires classiques libres. On peut ainsi montrer que le déphasage entre les ondes de de Broglie se propageant dans les deux bras d'un interféromètre en mouvement de rotation à la vitesse angulaire  $\Omega$  est donné, à l'ordre 1 en  $\Omega$ , par  $\delta\varphi = 2M\Omega \times S/\hbar$ ,  $S$  étant la surface orientée comprise entre les deux bras de l'interféromètre.

Un tel résultat est appliqué à l'interprétation d'une expérience réalisée sur des neutrons par Werner, Staudenmann et Colella et qui est la première expérience sur des ondes de matière mettant en évidence des effets d'interférence sensibles à la rotation. La rotation intervenant dans cette expérience est celle de la terre, de sorte que  $|\Omega|$  est très petit, de l'ordre de  $7.5 \cdot 10^{-5}$  rad/sec. De plus, la surface  $S$  de l'interféromètre n'est plus que de  $8.8 \text{ cm}^2$ . L'effet de la rotation terrestre est cependant clairement visible, ce qui montre la sensibilité des interféromètres à ondes de matière. Le calcul du déphasage dû à la rotation dans un interféromètre à ondes lumineuses est brièvement rappelé (effet Sagnac). On trouve  $\delta\varphi = 8\pi\Omega \cdot S/\lambda_0 c$  où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde lumineuse. Le gain de sensibilité d'un interféromètre à ondes de matière par rapport à un interféromètre à ondes lumineuses est donc de l'ordre de  $Mc^2/\hbar\omega_0$  où  $\hbar\omega_0$  est l'énergie des photons. On comprend ainsi pourquoi Michelson et Gale ont dû, pour détecter la rotation de la terre avec des ondes lumineuses, utiliser une surface d'interféromètre de l'ordre du  $\text{km}^2$ .

D'autres expériences plus récentes, réalisées en Allemagne, ont permis de mettre en évidence l'effet Sagnac sur des ondes de de Broglie associées à des atomes neutres. Ces expériences utilisent deux paires d'ondes progressives se propageant dans des sens opposés, c'est-à-dire la même configuration laser que celle décrite précédemment pour l'observation de franges de Ramsey optiques ne se brouillant pas lors de la moyenne sur les vitesses atomiques. Après un calcul détaillé du déphasage dû à la rotation, on présente et discute les divers résultats expérimentaux obtenus : observation du doublet de recul, suppression d'une composante du doublet de recul, sensibilité à la phase des ondes laser, déphasage produit par un déplacement lumineux, sensibilité à la rotation.

### *Interféromètres atomiques utilisant des doubles fentes*

Le cours de cette année se termine par une analyse des expériences d'interférométrie atomique à « division de front d'ondes », c'est-à-dire utilisant le passage des atomes à travers des microstructures, comme des doubles fentes, et réalisant donc pour les ondes de de Broglie atomiques l'équivalent de l'expérience des deux fentes d'Young en optique.

Le problème de base à résoudre est celui de la propagation d'une onde de de Broglie atomique à travers une fente. Ce problème est abordé dans le

cadre de l'approximation de Kirchhoff et de l'approximation paraxiale. La signification physique de ces approximations est précisée et on montre qu'elles reviennent à traiter classiquement le mouvement de la particule perpendiculairement au plan de la fente, le mouvement de la particule dans le plan de la fente étant lui traité quantiquement. Deux cas sont envisagés, suivant qu'un champ de pesanteur  $g$  perpendiculaire au plan de la fente est présent ou non. Ayant ainsi ramené le problème étudié à celui de la propagation temporelle d'une particule dans un espace à deux dimensions, on peut utiliser les propagateurs de Feynman, correspondant à  $g = 0$  ou  $g \neq 0$ , pour calculer à tout instant la fonction d'onde de la particule. Dans la zone de diffraction lointaine, deux causes de variation transversale de la fonction d'onde apparaissent alors clairement : d'une part, le déphasage dû à la propagation libre le long des trajectoires classiques et qui n'est autre que le facteur bien connu  $\exp \frac{i}{\hbar} S_{cl}$  ; d'autre part, le changement de direction de la vitesse de la particule

lors du passage à travers la fente qui fait apparaître un terme proportionnel à la transformée de Fourier spatiale de la fente et qui peut être interprété comme l'amplitude de probabilité pour que la particule incidente, d'impulsion  $\hbar \mathbf{k}$ , change d'impulsion lorsqu'elle traverse une fente de largeur finie. Les résultats obtenus sont aisément généralisés au cas où la particule traverse deux fentes parallèles et une expression simple est obtenue pour l'écart entre les franges d'interférences observables après traversée des deux fentes.

Deux séries d'expérience réalisées à Constance d'une part, à Tokyo d'autre part, ont permis d'observer de telles figures d'interférence. Ces expériences sont décrites et leurs résultats analysés à la lumière des calculs précédents. L'expérience de Constance utilise des atomes d'hélium métastable d'un jet supersonique et sa géométrie est telle que l'effet du champ de pesanteur est négligeable. L'expérience de Tokyo utilise un nuage d'atomes de Néon, préalablement piégés et refroidis par laser, et qu'on laisse ensuite tomber vers un système de deux fentes. Il est alors nécessaire de tenir compte de l'effet du champ de pesanteur. Il est possible également, dans ce cas, d'appliquer un champ électrique statique qui dévie transversalement la trajectoire des atomes.

D'autres expériences d'interférométrie atomique, à « division d'amplitude », utilisent le passage des atomes à travers un ensemble de réseaux périodiques de fentes qui séparent l'onde plane incidente en plusieurs ondes planes cohérentes entre elles, puis les recombinent (expériences réalisées au M.I.T. aux U.S.A.). Au lieu de réseaux de fentes, il est possible également d'utiliser le passage des atomes à travers des ondes laser stationnaires. Ces expériences seront analysées dans un cours ultérieur.

## COURS À LA MAISON RENÉ DESCARTES

Dans le cadre de la Chaire de Physique Atomique et Moléculaire du Collège de France, deux séminaires ont été donnés à l'Université Technique de Eindhoven aux Pays-Bas.

Le premier, intitulé « Quantum effects in laser cooling », a été consacré à une analyse d'expériences récentes portant sur des atomes refroidis par laser et où les températures obtenues sont si basses (de l'ordre du microKelvin) qu'il devient nécessaire d'utiliser un traitement quantique des degrés de liberté de translation de l'atome. Parmi les effets nouveaux qui ont été ainsi observés, on peut citer la quantification du mouvement de l'atome dans les puits de potentiel créés par l'onde lumineuse. Un autre effet intéressant est l'obtention de longueurs d'onde de de Broglie atomiques plus grandes que la longueur d'onde des lasers utilisés pour refroidir les atomes.

Le deuxième séminaire, intitulé « Manipulating atoms with photons », a eu pour but de montrer comment il est possible d'utiliser les échanges résonnants d'énergie, d'impulsion et de moment cinétique entre atomes et photons, pour contrôler, au moyen de faisceaux laser, les divers degrés de liberté d'un atome. Un certain nombre de développements récents dans ce domaine de recherche ont été décrits, notamment ceux qui permettent d'obtenir des atomes ultrafroids. Quelques applications possibles de ces recherches ont été également passées en revues, comme par exemple l'amélioration des horloges atomiques ou la réalisation de cavités gravitationnelles à atomes neutres.

C. C.-T.

## SÉMINAIRES 1992-1993

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.

Huit séminaires ont été organisés :

S. REYNAUD (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *Un miroir dans le vide : fluctuations, dissipation, stabilité.*

D. COURJON (Laboratoire d'Optique P.M. Duffieux, Université de Franche-Comté), *La microscopie optique en champ proche : un exemple d'application en optique non radiative.*

R. GRIMM (Max Planck Institut für Kernphysik, Heidelberg), *The magneto-optical force : a new stimulated radiation force.*

J. BAUDON (Laboratoire de Physique des Lasers, Université Paris-Nord), *Interférométrie atomique Stern-Gerlach.*

F. HAAKE (Université d'Essen et Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *Du succès déraisonnable des matrices aléatoires : le chaos en mécanique quantique.*

Ph. VERKERK (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *Cristallisation d'atomes sur un réseau de lumière.*

A. ZEILINGER (Université de Innsbruck), *Review on neutron interferometry.*

J. KIMBLE (California Institute of Technology, USA), *Quantum measurement in quantum optics.*

#### ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUDI effectue ses recherches au sein du Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure. Il y dirige avec M. Carl AMINOFF, 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'Ecole Normale Supérieure et à l'Université Paris VI, est implanté géographiquement, d'une part au Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure (24 rue Lhomond), d'autre part à l'Université Paris VI (quai Saint-Bernard). Il est dirigé depuis le 1<sup>er</sup> octobre 1985 par M. Jacques DUPONT-ROC, Directeur de Recherches au C.N.R.S.

Le personnel du Laboratoire comporte : 12 enseignants-chercheurs (professeurs, maître de conférences, agrégés-préparateurs), 25 chercheurs au C.N.R.S. (directeurs, et chargés de recherche), 23 chercheurs étrangers, 21 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 1992, ainsi que celles des thèses soutenues au cours de cette même année.

## PUBLICATIONS

HAROCHE S., BRUNE M., RAIMOND J.M., *Manipulation of optical fields by atomic interferometry : quantum variations on a theme by Young (Appl. Phys., B, 54, p. 355-365, 1992).*

WALLIS H., DALIBARD J., COHEN-TANNOUDJI C., *Trapping atoms in a gravitational cavity (Appl. Phys., B, B54, p. 407, 1992).*

COHEN-TANNOUDJI C., ZAMBON B., ARIMONDO E., *Propriétés statistiques de la suite de sauts quantiques associée à des processus dissipatifs (C.R. Acad. Sci., 314, p. 1139-1145, 1992).*

COHEN-TANNOUDJI C., ZAMBON B., ARIMONDO E., *Modèle simple d'amplification sans inversion de population. Etude par la méthode des sauts quantiques (C.R. Acad. Sci., 314, p. 1293-1299, 1992).*

BOUCHIAT M.A., GUENA J., LINTZ M., JACQUIER P., *Absolute measurements of the photoionization cross-section of the 5D5/2 Cs excited state and of the photodissociation cross-section of Cs<sub>2</sub> between 540 and 550 nm (Chem. Phys. Lett., 199, p. 85-92, 1992).*

NACHER P.J., SCHLEGER P., SHINKODA I., HARDY W.N., *CRYOGENICS, Heat exchange in liquid helium through thin plastic foils (32, p. 353-356, 1992).*

BERNARDOT F., NUSSENZWEIG P., BRUNE M., RAIMOND J.M., HAROCHE S., *Vacuum Rabi splitting observed on a microscopic atomic sample in a microwave cavity (Europhys. Lett., 17, p. 33-38, 1992).*

GOUEDARD G., BILLY N., GIRARD B., VIGUE J., *Purely hyperfine predissociation in the B state of the IF molecule (Europhys. Lett., 18, p. 397-402, 1992).*

BARDOU F., EMILE O., COURTY J.M., WESTBROOK C.I., ASPECT A., *Magneto-optical trapping of metastable helium ; collisions in the presence of resonant light (Europhys. Lett., 20, p. 681-686, 1992).*

EMILE O., BARDOU F., SALOMON C., LAURENT P., NADIR A., CLAIRON A., *Observation of a new magneto-optical trap (Europhys. Lett., 20, p. 687-691, 1992).*

MESTDAGH H., ROLANDO C., SABLIER M., BILLY N., GOUEDARD G., VIGUE J., *Gas phase reaction of ironcarbonyl cations with atomic hydrogen and atomic nitrogen (J. Am. Chem. Soc., 114, p. 771, 1992).*

GIRARD B., SITZ G.O., ZARE R.N., BILLY N., VIGUE J., *Polarization dependence of the AC Stark effect in multiphoton transitions of diatomic molecules* (*J. Chem. Phys.*, 97, p. 26, 1992).

ASPECT A., BAUCHE J., GODEFROID M., GRANGIER P., HANSEN J.E., VAECK N., *Experimental and MCHF isotope shifts of strongly perturbed levels in Cal* (*J. Phys. B*, 24, p. 4077, 1992).

BERG-SORENSEN K., CASTIN Y., BONDERUP E., MOLMER K., *Momentum diffusion of atoms moving in laser fields* (*J. Phys.*, B, 25, p. 4195-4215, 1992).

LOUNIS B., COHEN-TANNOUJDI C., *Coherent population trapping and Fano profiles* (*J. Physique*, II, p. 579-592, 1992).

BIGELOW N., NACHER P.J., LEDUC M., *Accurate optical measurements of nuclear polarization in optically pumped He3 gas* (*J. Physique*, II, p. 2159, 1992).

HAROCHÉ S., BRUNE M., RAIMOND J.M., *Measuring photon numbers in a cavity by atomic interferometry: optimizing the convergence procedure* (*J. Physique*, II, p. 659-670, 1992).

BOUCHIAT M.A., GUENA J., JACQUIER P., LINTZ M., POTTIER L., *From linear amplification to triggered superradiance: illustrative examples of stimulated emission and polarization spectroscopy for sensitive detection of a pulsed excited forbidden transition* (*J. Physique*, II, p. 727-747, 1992).

GOUEDARD G., BILLY N., GIRARD B., VIGUE J., *Hyperfine structure measurements in the IF B-X system* (*J. Physique*, II, p. 813, 1992).

WINELAND D., DALIBARD J., COHEN-TANNOUJDI C., *Sisyphus cooling of a bound atom* (*J.O.S.A.*, B, B9, p. 32-42, 1992).

ECKERT G., HEIL W., MEYERHOFF M., OTTEN E.W., SURKAU R., WERNER M., LEDUC M., NACHER P.J., SCHEARER L.D., *A dense polarized He3 target based on compression of optically pumped gas* (*Nucl. Instrum. Methods*, A, 320, p. 53-65, 1992).

BIRABEN F., JASMIN B., JULIEN L., NEZ F., VIGUE J., *Hyperfine structure of the A3III state of IBr* (*Opt. Commun.*, 92, p. 135, 1992).

BRUNE M., HAROCHÉ S., RAIMOND J.M., DAVIDOVICH L., ZAGURY N., *Manipulation of photons in a cavity by dispersive atom-field coupling: quantum nondemolition measurements and generation of « Schrödinger cat » states* (*Phys. Rev.*, A, 45-7, p. 5193-5214, 1992).

SANDOGHDAR V., SUKENIK C.I., HINDS E.A., HAROCHÉ S., *Direct measurement of the van der Waals interaction between an atom and its images in a micron-sized cavity* (*Phys. Rev. Lett.*, 68, p. 3432-3435, 1992).

VERKERK P., LOUNIS B., SALOMON C., COHEN-TANNOUJDI C., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Dynamics and Spatial Order of Cold Cesium Atoms in a Periodic Optical Potential* (*Phys. Rev. Lett.*, 68, p. 3861, 1992).

DALIBARD J., CASTIN Y., MOLMER K., *Wave-function approach to dissipative processes in quantum optics* (*Phys. Rev. Lett.*, 68, p. 580, 1992).

LOUNIS B., COURTOIS J.-Y., VERKERK P., SALOMON C., GRYNBERG G., *Measurement of the friction coefficient in 1D corkscrew optical molasses by stimulated Rayleigh spectroscopy* (*Phys. Rev. Lett.*, 69, p. 3029, 1992).

BOUCHIAT M.A., GUENA J., JACQUIER P., LINTZ M., *Measurement of the radiative lifetime of the cesium 5D5/2 level using pulsed excitation and delayed probe absorption* (*Z. Phys. D*, 24, p. 335-337, 1992).

COHEN-TANNOUDJI C., BARDOU F., ASPECT A., *Review on fundamental processes in laser cooling in « Laser Spectroscopy » X ed. by M. Ducloy, E. Giacobino and G. Camy* (*World Scientific*, p. 3, 1992).

COHEN-TANNOUDJI C., *Laser cooling and trapping of neutral atoms : theory, in « Quantum Optics », Proceedings of the XXth Solvay Conference, ed. by P. Mandel, (North-Holland, 1992)* (*Phys. Rep.*, 219, 153, 1992).

HILICO L., COURTY J.M., FABRE C., GIACOBINO E., ABRAM I., OUDAR J.L., *Squeezing with  $\chi_3$  materials ; numéro spécial sur « quantum noise reduction in optical systems : experiments »* (*Appl. Phys. B*, 55, p. 202-209, 1992).

RARITY J., TAPSTER P., LEVENSON J., GARREAU J.C., ABRAM I., MERTZ J., DEBUSSCHERT T., HEIDMANN A., FABRE C., GIACOBINO E., *Quantum correlated twin beams ; numéro spécial sur quantum noise reduction in optical system : experiments* (*Appl. Phys.*, B, 55, p. 250, 1992).

ROCH J.F., ROGER G., GRANGIER P., COURTY J.M., REYNAUD S., *Quantum non demolition measurements in optics : a review and some new experimental results ; n° spécial sur quantum noise reduction in optical systems : experiments* (*Appl. Phys.*, B, 55, p. 291-297, 1992).

HILICO L., VERKERK P., GRYNBERG G., *Conjugaison de phase par des atomes de cesium ultrafroids dans un piège magneto-optique* (*C.R. Ac. Sc. Paris*, 315, p. 285-291, 1992).

GRYNBERG G., PETROSSIAN A., PINARD M., VALLET M., *Phase contrast mirror based on four-wave mixing* (*Europhys. Lett.*, 17, p. 213-218, 1992).

HILICO L., FABRE C., GIACOBINO E., *Operation of a « cold atom laser » in a magneto-optical trap* (*Europhys. Lett.*, 18, p. 685, 1992).

PETROSSIAN A., PINARD M., MAITRE A., COURTOIS J.Y., GRYNBERG G., *Transverse pattern formation for counterpropagating laser beams in Rubidium vapor* (*Europhys. Lett.*, 18, p. 689-695, 1992).

BESWICK J.A., GLASS-MAUJEAN M., RONCERO O., *On large orientation effects in the photofragmentation of polyatomic molecules* (*J. Chem. Phys.*, 96, p. 7514-7527, 1992).

HALLEY M., DELANDE D., TAYLOR K.T., *The combination of R-matrix and complex coordinate methods : application to resonances in the diamagnetic Rydberg Spectrum of Li* (*J. Phys. B*, L525, 1992).

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Motional Casimir force* (*J. Physique*, 12, p. 149-165, 1992).

BOULOUBA N., CACCIANI P., DELSART C., LUC-KOENIG E., PINARD J., DELANDE D., GAY J.C., *From regularity to chaos : a direct experimental test using atoms in magnetic field* (*J. Physique*, II, p. 67, 1992).

COURTOIS J.Y., GRYNBERG G., *Spatial pattern formation for counterpropagating beams in a Kerr medium : a simple model* (*Optics Commun.*, 87, p. 186-192, 1992).

VALLET M., PINARD M., GRYNBERG G., *Two-wave mixing with cross-polarized beams in sodium : a quantitative investigation* (*Optics Commun.*, 87, p. 340-350, 1992).

GRANGIER P., COURTY J.M., REYNAUD S., *Characterization of nonideal quantum non-demolition measurements* (*Optics Commun.*, 89, p. 99-106, 1992).

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Causality, stability and passivity for a mirror in vacuum* (*Phys. Lett., A*, 167, p. 227-232, 1992).

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Friction and inertia for a mirror in a thermal field* (*Phys. Lett., A*, 1992).

COURTOIS J.Y., GRYNBERG G., *Probe transmission in 1D optical molasses - Theory for linearly polarized cooling beams* (*Phys. Rev., A*, 1992).

GUO J., BERMAN P.R., DUBETSKY B., GRYNBERG G., *Recoil-induced resonances in Nonlinear Spectroscopy* (*Phys. Rev. A*, 46, p. 1426-1437, 1992).

COURTY J.M., REYNAUD S., *Generalized linear input output theory for quantum fluctuations* (*Phys. Rev., A*, 46, p. 2766-2777, 1992).

HILICO L., FABRE C., REYNAUD S., GIACOBINO E., *Linear input-output method of the calculation of the quantum fluctuations in optical bistability* (*Phys. Rev., A*, 46, p. 4397-4405, 1992).

VERKERK P., GRYNBERG G., PICHARD B., SPIRO M., ZYLBERAJCH S., GOLDBERG M.E., FAYET P., *Search for superheavy hydrogen in sea water* (*Phys. Rev. Lett.*, 68, p. 1116-1119, 1992).

NEZ F., PLIMMER M.D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., ACEF O., ZONDY J.J., LAURENT P., CLAIRON A., *Precise frequency measurement of the 2S-8S/8D transitions in atomic hydrogen : new determination of the Rydberg Constant* (*Phys. Rev. Lett.*, 69, p. 2326, 1992).

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Fluctuations and dissipation for a mirror in the vacuum* (*Quantum Optics*, 4, p. 39-53, 1992).

WESTBROOK C., ASPECT A., BARDOU F., COHEN-TANNOUDJI C., EMILE O., GERZ C., SILVERA I.F., *Magneto-optical trap for metastable helium in Laser Spectroscopy X*, ed. by M. Ducloy, E. Giacobino and G. Camy, (World Scientific, p. 48, 1992).

*Ouvrages et cours donnés à des écoles d'été*

COHEN-TANNOUDJI C., DUPONT-ROC J., GRYNBERG G., *Atom-Photon Interactions : Basic processes and Applications*, Wiley, New York (1992).

COHEN-TANNOUDJI C., *Atomic motion in laser light*, in *Fundamental Systems in Quantum Optics*, ed. by J. Dalibard, J.M. Raimond and J. Zinn-Justin, (Elsevier Science, Publishers B.V., p. 1-164, 1992).

COHEN-TANNOUDJI C., *New Laser cooling mechanisms* in *Laser Manipulation of Atoms*, ed. by E. Arimondo, W.D. Phillips and F. Strumia, (North-Holland, Amsterdam, p. 99-169, 1992).

THÈSES

J. HARE, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1992, *Etude théorique et expérimentale des atomes de Rydberg circulaires : vers une mesure directe de la constante de Rydberg en unités de fréquence* » (18 février 1992).

D. GRISON, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1992, *Atomes piégés et refroidis par laser à quelques microkelvins : un piège magnéto-optique dans une cellule de césium et quelques applications* » (6 février 1992).

Y. CASTIN, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1992, *Les limites du refroidissement laser dans les mélasses optiques à une dimension* (28 février 1992).

ACTIVITÉS DIVERSES - MISSIONS - CONFÉRENCES

*Conférences invitées à des Conférences Internationales*

— Conférence plénière à la réunion de l'American Physical Society, Washington, avril 1992.

— Workshop on Optics and Interferometry with Atoms, Reichenau, juin 1992.

— International Quantum Electronics Conference, Vienne, juin 1992.

- Second research workshop on Quantum Optics, Weizman Institute, Israël, juin 1992.
- International Conference on Atomic Physics, Munich, août 1992.
- III<sup>e</sup> Reunion di Ottica, Barcelone, septembre 1992.

*Séjour en Allemagne en tant que lauréat de la Fondation Alexander von Humboldt*

— Séjour de 1 mois à Munich et Garching (mai 1992), 3 conférences données au Max Planck Institut für Quantenoptik.

— Colloquium présenté à Ulm (juin 1992).

— Séjour de 15 jours à Constance (août 1992).

Un colloquium + 2 Cours.

— Séjour de 15 jours à Mayence (octobre 1992).

Un colloquium + 3 Cours.

*Séminaires*

- Ecole Centrale (janvier 1992).
- Université de Montpellier (janvier 1992).
- Williams College, U.S.A. (avril 1992).
- M.I.T., U.S.A. (avril 1992).
- Université Paris Nord (décembre 1992).

*Distinctions*

Julius Edgar Lilienfeld Prize de l'American Physical Society.

Elu Foreign Member of the American Academy of Arts and Sciences.

Elu Foreign Member of the European Academy of Arts and Sciences.