

Physique atomique et moléculaire

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

Le cours de l'année 2003-2004, qui est le dernier cours donné dans le cadre de la Chaire de physique atomique et moléculaire, a été consacré à la présentation d'un bilan des développements importants survenus au cours des dernières décennies dans la compréhension, la description et l'utilisation des interactions atomes-photons. Le but était d'analyser l'évolution des idées dans ce domaine, d'essayer de comprendre la genèse des développements survenus et de discuter les nouvelles perspectives, les nouveaux domaines de recherche, qui semblent s'ouvrir à la suite de ces développements.

Introduction générale

La première séance a été consacrée à un essai de classement des divers développements de ce domaine de recherche, classement basé sur les motivations qui ont stimulé les diverses études entreprises. L'émission et l'absorption de rayonnement par les atomes a été en effet utilisée dans plusieurs buts comme :

- une source d'information sur la structure et la dynamique des atomes ;
- une source de perturbations pour ces atomes ;
- un « banc d'essai » pour élaborer et tester diverses approches théoriques ;
- des systèmes simples pour tester des théories fondamentales ;
- un cadre simple pour étudier des effets d'ordre supérieur et des méthodes non perturbatives ;
- un outil pour manipuler les atomes et pour contrôler leur polarisation, leur position, leur vitesse ;
- un moyen commode pour préparer des états quantiques intéressants.

Quelques idées directrices ont été aussi introduites pour guider l'analyse de l'effet des interactions atomes-photons, comme l'identification des diverses étapes d'une expérience (préparation, évolution, détection), les lois de conserva-

tion, la comparaison des diverses échelles de temps intervenant dans le problème étudié.

Les méthodes optiques

La seconde séance a été consacrée à une présentation des expériences originales utilisant la lumière de résonance absorbée et émise par les atomes pour détecter la résonance magnétique dans les états excités et fondamentaux des atomes. Il s'agit des méthodes optiques, développées par Alfred Kastler et Jean Brossel au début des années 1950, et qui ont été à l'origine d'un développement spectaculaire de la physique atomique en France et dans le monde.

L'idée de base consiste à utiliser les échanges de moment cinétique entre atomes et photons polarisés pour peupler sélectivement un sous-niveau magnétique de l'atome, appelé également sous-niveau Zeeman, ou pour détecter la présence de l'atome dans tel ou tel sous-niveau. On peut ainsi créer une différence de populations entre sous-niveaux Zeeman et détecter tout changement de ces différences de populations induit par des transitions de résonance magnétique ou des processus de collision avec d'autres atomes ou des parois.

La méthode de double résonance, permettant d'étudier les états excités des atomes, et la méthode de pompage optique, applicable aux états fondamentaux, sont décrites et leurs caractéristiques intéressantes soulignées : taux de polarisation élevés, grande sensibilité, résolution élevée, réalisation de situations hors d'équilibre.

Un certain nombre de points délicats sont également approfondis. On montre que le renversement observé à hautes intensités du champ de radiofréquence sur les courbes de double résonance obtenues sur un spin 1 est dû à une interférence quantique entre deux amplitudes à 1 et 3 photons. Le mécanisme d'orientation des spins nucléaires par pompage optique est également analysé. On montre que le moment cinétique des photons est d'abord transféré aux électrons atomiques, puis des électrons aux spins nucléaires par l'interaction hyperfine entre électrons et noyaux. On rappelle enfin le mécanisme de la réduction de l'élargissement Doppler par effet Dicke, un effet qui joue également un rôle important dans des travaux plus récents portant sur le spectre de fréquences émises ou absorbées par un ion piégé.

Les photons : une source de perturbations pour l'atome

Un atome interagissant avec une onde électromagnétique incidente subit des perturbations : ses niveaux d'énergie sont déplacés et élargis. Les deux séances suivantes du cours sont consacrées à une interprétation physique de ces effets et à une description de leur observation expérimentale, tout d'abord pour une excitation quasi résonnante, puis pour une excitation haute fréquence. Un parallèle est établi entre ces perturbations subies par l'atome et celles subies par l'onde et

décrites par l'indice de réfraction. On compare aussi ces perturbations dues à une onde incidente aux corrections radiatives étudiées en électrodynamique quantique pour un atome placé dans le vide de photons (déplacement de Lamb, anomalie de spin $g-2$ de l'électron). On montre enfin que ces interactions peuvent être aussi utilisées de manière positive pour manipuler les atomes et préparer des nouveaux états intéressants.

Interaction d'un atome avec une onde quasi résonnante

Le déplacement et l'élargissement des niveaux d'énergie d'un atome interagissant avec une onde lumineuse quasi résonnante sont introduits simplement à partir d'une approche « atome habillé par les photons », puis interprétés semiclassiquement. Les premières expériences mettant en évidence ces effets au début des années 1960 sont décrites. On souligne l'importance de tenir compte de ces effets en spectroscopie à haute résolution (horloges atomiques, spectroscopie laser) pour accéder aux fréquences atomiques non perturbées.

L'approche atome habillé permet également de rendre compte simplement des perturbations introduites sur le champ : dispersion anormale modifiant la vitesse de propagation du champ, amortissement de l'amplitude du champ par absorption de photons.

On montre enfin que les déplacements lumineux peuvent être utilisés pour créer des puits ou des barrières de potentiel dont on peut modifier à volonté les paramètres. La profondeur des puits et la hauteur des barrières sont faibles. Mais la possibilité récente d'obtenir des atomes très lents et très froids grâce au refroidissement laser entraîne que ces puits et barrières sont maintenant suffisants pour piéger et faire rebondir de tels atomes. Plusieurs applications récentes des déplacements lumineux sont ainsi passées en revue : pièges laser, miroirs pour atomes, réseaux périodiques de puits de potentiel optique. Une application récente du déphasage d'un champ produit par son interaction avec un atome est également mentionnée. Comme ce déphasage a des signes opposés suivant que l'atome est dans l'état excité e ou fondamental f , l'interaction du champ avec un atome dans une superposition linéaire de e et de f permet de préparer le champ dans une superposition linéaire de deux états de phase mésoscopiquement différents.

Interaction avec une onde haute fréquence

Lorsqu'un atome de moment cinétique $1/2$ (spin $1/2$) interagit avec un champ de radiofréquence (RF) de fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence de précession de Larmor du spin, le moment magnétique effectif du spin est réduit, voire même annulé. L'interprétation physique de cet effet est présentée, ainsi que les expériences qui ont permis de l'observer.

Un autre exemple important d'atome couplé à une onde haute fréquence est celui d'un électron faiblement lié, par exemple dans un état de Rydberg, interagissant avec un champ laser haute fréquence. On rappelle les travaux théoriques

ayant permis d'obtenir un hamiltonien effectif décrivant comment le mouvement lent de la charge et du spin de l'électron est modifié par le mouvement rapide de vibration dans le champ haute fréquence. Tous les nouveaux paramètres, nouvelle masse, nouveau moment magnétique, facteurs de forme électrique et magnétique, caractérisant ce mouvement lent sont interprétés semi-classiquement.

Tous ces travaux permettent enfin d'apporter un nouvel éclairage sur les corrections radiatives de l'électrodynamique quantique. On peut en effet essayer d'étendre les images obtenues sur la modification du mouvement lent d'un électron vibrant dans un champ incident haute fréquence au cas d'un électron vibrant dans les fluctuations quantiques du champ du vide. Peut-on ainsi interpréter semi-classiquement le déplacement de Lamb et l'anomalie $g-2$ de spin de l'électron ?

De nombreux travaux ont été consacrés à ces questions et on essaie de résumer leurs conclusions. À l'ordre le plus bas dans le paramètre de couplage, deux types d'effets sont à l'origine des corrections radiatives : l'interaction de l'électron avec les fluctuations quantiques du vide et l'interaction de l'électron avec son propre champ (réaction de rayonnement). Tous les effets liés à l'interaction avec les fluctuations du vide ont la même interprétation physique que celle dégagée à propos de l'interaction avec un champ incident haute fréquence. Il suffit de remplacer ce champ incident par les fluctuations du vide, caractérisées par leur densité spectrale. On peut ainsi comprendre simplement l'origine physique du déplacement de Lamb. Les fluctuations quantiques du vide ne sont pas cependant suffisantes pour expliquer l'ensemble des corrections radiatives. Il faut aussi faire intervenir la réaction de rayonnement qui joue un rôle essentiel pour changer la masse effective de l'électron et expliquer l'anomalie $g-2$ du spin de l'électron.

Processus multiphotoniques

Le cours se poursuit par l'étude des processus multiphotoniques qui sont des processus impliquant non pas un seul, mais plusieurs photons. Ils font donc intervenir plusieurs interactions entre l'atome et le champ électromagnétique et nécessitent de ne pas se limiter à l'ordre le plus bas de la théorie des perturbations, ce qui représente une stimulation pour développer des traitements non perturbatifs. Ces processus ont également un très vaste champ d'applications pratiques. Les non linéarités dans la réponse de l'atome au champ auxquels ils donnent naissance peuvent en effet être utilisées pour générer des nouvelles fréquences, coupler des ondes entre elles, guider des ondes, corriger des distorsions de phase. C'est tout le champ d'applications de l'optique non linéaire.

Processus multiphotoniques dans le domaine des radiofréquences

Les processus multiphotoniques ont été observés pour la première fois dans le domaine des radiofréquences. Un atome passe d'un sous-niveau Zeeman à un autre sous-niveau Zeeman par absorption de plusieurs photons de radiofréquence.

Les expériences correspondantes sont décrites et les résonances observées interprétées très simplement en termes de conservation de l'énergie totale et du moment cinétique total du système global atome + photons au cours de la transition. Les résonances à plusieurs photons s'élargissent et se déplacent quand l'intensité du champ de radiofréquence augmente. Ces effets sont reliés aux caractéristiques des anticroisements qui apparaissent dans le diagramme d'énergie du spin habillé par les photons de radiofréquence. Ce point de vue global permet également de comprendre l'évolution des niveaux d'énergie du spin habillé aux très hautes intensités où un traitement perturbatif n'est plus possible.

Processus multiphotoniques dans le domaine optique

Les hautes intensités délivrées par les sources laser ont permis également d'observer et d'étudier de nombreux processus multiphotoniques dans le domaine optique.

On commence par étudier les transitions multiphotoniques optiques entre deux états discrets d'un atome. Les éléments nouveaux qui apparaissent par rapport au domaine des radiofréquences sont soulignés : importance des échanges d'impulsion entre atomes et photons et des effets Doppler et de recul qui leur sont associés ; importance de l'émission spontanée qui n'est plus négligeable ; très grande richesse de niveaux atomiques. Des diagrammes énergie-impulsion sont introduits, qui se révèlent très commodes pour interpréter plusieurs phénomènes importants comme les transitions à deux photons sans effet Doppler et l'absorption saturée. Les processus Raman stimulés sont également décrits, ainsi que quelques applications auxquelles ils donnent naissance : excitation très sélective en vitesse, réalisation de lames séparatrices pour l'optique atomique, mesure du spectre d'excitations élémentaires d'un condensat. D'autres applications seront étudiées plus loin dans le contexte du refroidissement laser.

Les transitions multiphotoniques optiques existent également entre un état discret de l'atome et le continuum d'ionisation de l'atome. L'absorption d'un seul photon est parfois insuffisante pour ioniser l'atome. Par contre, des processus d'ionisation multiphotonique peuvent apparaître au cours desquels l'atome est ionisé par absorption de plusieurs photons qui lui fournissent l'énergie globale nécessaire. Les expériences ayant permis l'observation de tels processus sont décrites, de même que les études des paramètres influençant le taux d'ionisation multiphotonique : cohérence et polarisation du champ laser, résonances intermédiaires. D'autres phénomènes sont également décrits, comme les transitions entre états du continuum apparaissant une fois que l'atome est ionisé (ionisation au-dessus du seuil) ou la génération d'harmoniques d'ordre très élevé. Des aperçus sont donnés sur le traitement non perturbatif de ces effets et sur les applications auxquelles ils donnent naissance, comme la génération de nouvelles sources de rayonnement dans le domaine X ou d'impulsions sub-femtoseconde.

On passe enfin en revue quelques effets nouveaux apparaissant aux très hautes intensités qui sont maintenant délivrées par des nouvelles sources laser utilisant l'amplification d'impulsions à dérive de fréquence. Le mouvement de vibration de l'électron dans l'onde incidente devient alors relativiste. Quelques développements très récents sont décrits comme l'accélération d'électrons dans l'onde de sillage créée par l'impulsion laser dans un plasma ou l'autofocalisation relativiste.

Superpositions linéaires d'états et interférences quantiques

La description d'un ensemble d'atomes en termes des populations des divers niveaux d'énergie atomiques est en général insuffisante. Les atomes peuvent exister dans des superpositions linéaires d'états qui sont à l'origine du fait que l'amplitude de probabilité associée à un processus peut apparaître comme une somme d'amplitudes dont le carré du module contient des termes d'interférences. Les effets physiques nouveaux liés à ces termes d'interférences sont impossibles à décrire et à comprendre en termes de populations et de taux de transition. Deux séances ont été consacrées à la discussion de ces effets.

Au cours de la première séance, on a montré tout d'abord comment les interactions atome-photon permettent de créer et de détecter des cohérences Zeeman, hyperfines ou optiques, c'est à dire des superpositions linéaires de deux sous-niveaux Zeeman différents appartenant au même niveau hyperfin de l'état fondamental ou excité d'un atome, à deux niveaux hyperfins différents, au niveau fondamental et au niveau excité d'un atome. Des équations simples sont introduites pour décrire l'évolution des éléments non diagonaux correspondants de l'opérateur densité. Un certain nombre d'effets importants liés à ces superpositions d'états sont passés en revue et décrits :

- résonances de croisements de niveaux, qui peuvent être très fines quand elles apparaissent dans l'état fondamental de l'atome de très longue durée de vie, et qui peuvent être utilisées pour détecter des champs magnétiques très faibles, inférieurs au nanogauss ;
- résonances apparaissant lors de l'excitation de l'atome par un faisceau lumineux d'intensité modulée ;
- battements quantiques apparaissant sous forme d'une modulation de la lumière réémise par l'atome après excitation optique par une impulsion lumineuse très brève ;
- piégeage cohérent de populations et états noirs pour lesquels l'absorption de lumière est bloquée par suite d'une interférence destructive entre deux amplitudes d'absorption ;
- affinement des raies de double résonance par diffusion multiple cohérente.

Tous les effets précédents ont été étudiés grâce au développement des méthodes optiques rappelées au début du cours de cette année. Les notions de base sur les superpositions d'états qu'elles ont permis de dégager se sont révélées utiles

pour aborder d'autres problèmes plus récents analysés dans une seconde séance consacrée aux interférences quantiques.

Les interférences quantiques entre deux amplitudes multiphotoniques reliant un même état initial à un même état final peuvent conduire à des variations spectaculaires du taux d'ionisation de l'atome quand on varie la fréquence du champ incident. De manière plus générale, un nouveau champ de recherche est apparu, appelé « contrôle cohérent » où l'on utilise des interférences quantiques pour bloquer un processus physique ou chimique, ou l'orienter dans tel ou tel sens. La condition d'accord de phase dans le mélange à quatre ondes dégénéré est également interprétée comme une condition permettant l'interférence entre les ondes générées par les divers atomes du milieu lors du processus multiphotonique.

Les états intriqués sont un autre exemple important de superposition linéaire d'états. Ces états sont chacun des produits tensoriels d'un état relatif à un système 1 et d'un état relatif à un autre système 2. L'état intriqué lui-même ne peut être factorisé sous cette forme et il caractérise l'existence de corrélations quantiques non intuitives entre les deux systèmes. On mentionne l'importance de ces corrélations pour la violation des inégalités de Bell et on décrit quelques réalisations récentes de paires de photons intriqués. On aborde enfin le problème des cohérences spatiales d'un atome qui caractérise le fait que cet atome est dans une superposition linéaire de deux états localisés en des points différents. L'étude de ces cohérences spatiales permet d'introduire des notions importantes comme la longueur de cohérence spatiale. Le lien entre cohérences spatiales et distribution d'impulsion permet également d'expliquer la fragilité des cohérences spatiales vis à vis de tout processus augmentant la largeur de la distribution d'impulsion, comme l'émission spontanée d'un photon ou des collisions avec d'autres atomes pour une particule brownienne. Dans ce dernier cas, le taux de destruction des cohérences spatiales est beaucoup plus rapide que le taux d'amortissement de la vitesse de la particule, par un facteur égal au carré du rapport entre la distance séparant les deux points entre lesquels existe une cohérence spatiale et la longueur d'onde de de Broglie de la particule. Cet exemple montre clairement la difficulté de préserver des superpositions de deux états localisés en deux points séparés par une distance macroscopique.

Manipulation du mouvement d'une particule atomique

La séance suivante du cours est consacrée à la description des méthodes permettant de contrôler la position et la vitesse d'une particule atomique : particule neutre, molécule, ion, électron. Ce contrôle est réalisé au moyen de forces : forces de Lorentz agissant sur une particule chargée, forces de gradients de champ magnétique ou électrique agissant sur des particules neutres possédant un moment dipolaire permanent, magnétique ou électrique, forces radiatives résultant de l'échange d'impulsion entre atomes et photons. Le but poursuivi dans ces

expériences est de piéger les particules en les confinant dans une petite région de l'espace, et de les refroidir, c'est à dire de diminuer leur dispersion d'impulsion.

On commence par étudier les forces radiatives qui peuvent être classées en deux grandes catégories : les forces dissipatives associées à des transferts d'impulsion de photons vers des atomes lors de cycles absorption-émission spontanée ; les forces réactives associées à une redistribution cohérente de photons entre les diverses ondes planes constituant l'onde laser lors de cycles absorption-émission stimulée. Une interprétation des forces réactives en termes de gradients spatiaux des niveaux d'énergie de l'atome habillé est également présentée. On montre comment il est possible de ralentir et d'immobiliser un jet atomique au moyen de la pression de radiation associée aux forces dissipatives.

Les différents types de pièges sont ensuite passés en revue : piège de Penning et de Paul pour des particules chargées ; pièges magnéto-optiques utilisant une combinaison de gradients de champs et de pressions de radiation exercées par des ondes laser de polarisations circulaires.

On aborde enfin le problème du refroidissement et la description des diverses méthodes de refroidissement qui ont été proposées et démontrées : refroidissement laser Doppler utilisant une force d'amortissement de la vitesse résultant d'un déséquilibre dû à l'effet Doppler entre deux forces de pression de radiation opposées ; refroidissement Sisyphe résultant de corrélations entre les modulations spatiales de déplacements lumineux et de taux de pompage, et plaçant l'atome dans la situation du héros de la mythologie grecque, où il est condamné à gravir sans cesse des collines de potentiel ; refroidissement subrecul par états noirs sélectifs en vitesse où, au cours de leur marche au hasard dans l'espace des vitesses, les atomes sont piégés dans des états noirs de vitesse très faible dans lesquels ils s'accumulent. On montre que ces marches au hasard sont anormales, dominées par des événements rares, et on souligne l'intérêt d'utiliser les statistiques de Paul Lévy pour rendre compte quantitativement des caractéristiques essentielles de cette méthode de refroidissement.

Applications des atomes ultrafroids

Les progrès réalisés dans la manipulation des systèmes atomiques ouvrent la voie à de nombreuses applications passées en revue dans la séance suivante du cours.

Une première catégorie d'applications concerne les mesures effectuées sur une particule unique. On décrit les expériences réalisées sur un électron unique piégé et ayant conduit à la détermination la plus précise de l'anomalie $g-2$ de spin de l'électron. On montre aussi qu'il est possible de détecter la lumière de fluorescence émise par un ion unique piégé, excité par un faisceau laser résonnant. L'observation de cette lumière a permis de mettre en évidence les « sauts quantiques » effectués dans certaines conditions par l'ion entre son état électronique

fondamental et un état métastable. On présente une interprétation simple de ces sauts quantiques à partir de la « fonction délai » qui donne la répartition des intervalles de temps séparant deux émissions spontanées successives de photons par l'ion. Les expériences portant sur un système atomique unique ont stimulé toute une série de nouvelles approches théoriques (simulations Monte-Carlo, fonctions d'onde stochastiques...) où l'on s'intéresse à l'interprétation d'une seule réalisation d'une expérience et non plus à des moyennes d'ensemble.

Une autre catégorie d'applications des atomes froids concerne la réalisation de standards de fréquence et d'horloges atomiques de grande précision. Une mesure physique est en effet d'autant plus précise que le temps d'observation est plus long. Les atomes froids étant très lents peuvent être observés pendant des temps très longs, ce qui permet d'avoir des résonances très fines et donc un asservissement très précis des oscillateurs sur ces raies atomiques servant d'étalons de fréquence et donc de temps. On décrit les progrès réalisés au cours des dernières années sur les horloges atomiques à atomes froids (fontaines atomiques, expériences en microgravité), ainsi que les projets actuels de placer de telles horloges dans la station spatiale internationale. Quelques tests des théories fondamentales réalisés au moyen de ces horloges sont également mentionnés.

Les atomes froids de faible vitesse ont également une grande longueur d'onde de de Broglie puisque cette longueur d'onde est inversement proportionnelle à la vitesse. L'aspect ondulatoire du mouvement des atomes est donc plus facile à mettre en évidence sur des atomes froids et c'est ce qui explique le développement d'un nouveau champ de recherche, l'interférométrie atomique, où l'on observe et utilise les franges d'interférence obtenues quand on superpose deux ondes de de Broglie atomiques ayant suivi des chemins différents. Quelques exemples d'interféromètres atomiques sont passés en revue. On insiste sur les avantages de ces interféromètres par rapport aux interféromètres optiques et sur les effets typiquement quantiques qu'ils ont permis d'observer (modulation de fréquence des ondes de de Broglie réfléchies par un miroir vibrant, oscillations de Bloch).

Gaz quantiques dégénérés

Une séance entière est consacrée à ce domaine de recherche récemment ouvert par la possibilité de refroidir des gaz atomiques à des températures très basses.

On commence par un rappel très bref sur les propriétés d'un gaz de bosons identiques ou de fermions identiques confinés dans un piège harmonique. La statistique de Bose-Einstein et le phénomène de condensation prévus par Einstein en 1925 pour un gaz de bosons quand la température est inférieure à une certaine température critique sont décrits, ainsi que la possibilité de détecter la condensation par le caractère bimodal de la distribution spatiale des atomes piégés. L'interprétation ondulatoire de la condensation est également donnée en termes d'interférences entre les paquets d'ondes associés aux divers atomes.

Après avoir précisé les diverses longueurs caractéristiques du problème (portée du potentiel d'interaction entre deux atomes, longueur d'onde de de Broglie, distance moyenne entre atomes), on décrit l'évolution générale des idées au cours de la longue période séparant l'article originel d'Einstein en 1925 et la première observation expérimentale de la condensation de Bose-Einstein dans les gaz en 1995. On montre en particulier comment la recherche d'effets quantiques dans les gaz, le renouveau d'intérêt pour les gaz d'atomes polarisés à très basse température, les longues recherches poursuivies sur l'hydrogène polarisé ont permis la mise au point de concepts nouveaux et de méthodes nouvelles, comme le refroidissement évaporatif, qui ont joué un rôle décisif dans les succès obtenus sur les alcalins.

L'intérêt d'observer la condensation de Bose-Einstein sur des gaz est que l'effet des interactions entre atomes, qui est plus faible que dans un liquide ou un solide, peut-être étudié de manière beaucoup plus approfondie. En fait, à très basse température, quand la longueur d'onde de de Broglie des atomes devient supérieure à la portée du potentiel d'interaction atome-atome, un seul nombre est suffisant pour décrire les collisions élastiques entre atomes, la « longueur de diffusion ». Ce paramètre important est interprété physiquement. Son signe, positif ou négatif, est relié au caractère répulsif ou attractif des interactions effectives à grande distances entre atomes. On montre aussi que la longueur de diffusion peut-être modifiée en grandeur et en signe en balayant simplement un champ magnétique statique autour d'une valeur pour laquelle l'énergie relative des deux atomes entrant en collision dans un canal dit d'entrée est résonnante avec l'énergie d'un autre état discret de deux atomes dans un autre canal où leurs spins sont orientés de manière différente. Ces résonances appelées « résonances de Feshbach » jouent maintenant un rôle essentiel dans toutes les études portant sur les gaz quantiques dégénérés car elles permettent de modifier à volonté les interactions effectives entre atomes. Quelques rappels sont également présentés sur les théories de champ moyen et sur l'équation de Gross-Pitaevskii décrivant comment chaque boson évolue dans le potentiel de piégeage et dans le champ moyen créé par les autres bosons.

Une brève revue est enfin présentée sur les résultats obtenus au cours des dernières années sur les gaz quantiques dégénérés. Comme les cours des cinq dernières années ont porté sur la condensation de Bose-Einstein, on se contente de rappeler les résultats les plus importants : forme et modes de vibration des condensats, interférences entre condensats et mise en évidence de leur cohérence, lasers à atomes, tourbillons quantiques, solitons d'ondes de matière, transition superfluide-isolant de Mott, condensats sur des puces. Quelques résultats très récents sur les gaz de Fermi dégénérés sont également présentés : mise en évidence de la pression de Fermi, obtention de condensats de molécules formées à partir de deux atomes fermioniques de spin opposés.

Conclusion générale

La dernière séance du cours a été consacrée à la leçon de clôture qui a consisté en une réflexion personnelle sur l'évolution du domaine de recherche couvert par la chaire de physique atomique et moléculaire, sur la manière dont progresse la recherche fondamentale et sur son impact sur les applications, sur la situation de la recherche dans notre pays. Mentionnons simplement ici que cette leçon de clôture a donné lieu à un article paru dans le n° 10 de la Lettre du Collège de France.

Séminaires

Les séminaires de cette année ont été remplacés par un symposium, organisé conjointement avec la chaire de physique quantique et avec l'aide de la Fondation Hugot du Collège de France. Ce symposium intitulé :

« Manipulation d'atomes et de photons »

a été dédié à La mémoire du Professeur Jean Brossel, l'un des fondateurs de l'école actuelle de physique atomique française, décédé le 4 février 2003. Il s'est tenu à l'amphithéâtre Marguerite de Navarre le 16 janvier 2004 et a consisté en neuf exposés :

— Bernard Cagnac (Paris)

« *Les débuts du Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne* »

— Jean Dalibard (Paris)

« *Manipulation de condensats atomiques — La cohérence quantique à l'œuvre* »

— Bertrand Girard (Toulouse)

« *Contrôle cohérent avec des impulsions laser ultracourtes mises en forme* »

— Theodor W. Hänsch (Munich)

« *Ultraprecise optical spectroscopy* »

— Daniel Kleppner (MIT, USA)

« *Jean Brossel at MIT* »

— Jean-Claude Lehmann (Paris)

« *Quelques souvenirs sur Jean Brossel* »

— Luigi Moi (Sienne)

« *From optical pumping to dark resonances* »

— Ernst Wilhelm Otten (Mayence)

« *Some recent applications of optical pumping in nuclear physics and medicine* »

— Jean-Michel Raimond (Paris)

« *Quantum Rabi oscillations in a mesoscopic field : entanglement, complementarity and Schrödinger cats* »

Séminaires donnés à l'étranger

Deux séminaires ont été donnés à Bonn, Allemagne, dans le cadre de la Chaire Ernst Robert Curtius.

Le premier séminaire, très général, car destiné à un public d'étudiants de l'université de Bonn, a présenté les grandes lignes des méthodes de manipulation des atomes par la lumière ainsi que les principales applications.

Le second séminaire, destiné à des spécialistes, a décrit des résultats récents obtenus dans notre équipe sur les atomes d'hélium métastable : condensation de Bose-Einstein de ces atomes, formation de dimères géants d'hélium métastable par photoassociation.

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude Cohen-Tannoudji effectue ses recherches au sein du Laboratoire Kastler Brossel au Département de Physique de l'École Normale Supérieure. Il anime 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 CNRS, à l'École Normale Supérieure et à l'Université Paris VI, est implanté géographiquement, d'une part au Département de Physique de l'École Normale Supérieure (24, rue Lhomond), d'autre part à l'Université Paris VI (place Jussieu). Il est dirigé depuis le 1^{er} mars 2001 par M. Franck Laloë, Directeur de Recherche au CNRS.

Le personnel du Laboratoire comporte : 22 enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, agrégés-préparateurs), 28 chercheurs au CNRS (directeurs et chargés de recherche), 19 chercheurs et post-doctorants étrangers, 35 élèves de grandes écoles et thésitifs, 19 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 CNRS. 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 de l'équipe atomes ultrafroids en 2003, ainsi que celle des thèses soutenues par des membres de cette équipe au cours de cette même année.

PUBLICATIONS

C.F. ROOS, P. CREN, D. GUÉRY-ODELIN, and J. DALIBARD, *Europhys. Lett.* **61**, 187, (2003)

« *Continuous loading of a non-dissipative atom trap* ».

M. GOZZINI, S. STRINGARI, V. BRETIN, P. ROSENBUSCH, and J. DALIBARD, *Phys. Rev. A* **67**, 021602 (2003)

« *Scissors mode of a rotating Bose-Einstein condensate* ».

V. BRETIN, P. ROSENBUSCH, F. CHEVY, G.V. SHLYAPNIKOV, and J. DALIBARD, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 100403 (2003)

« *Quadrupole oscillation of a Single-Vortex Condensate* ». *Evidence for Kelvin modes.*

V. BRETIN, P. ROSENBUSCH, and J. DALIBARD, *J. Opt. B : Quantum Semiclass. Opt.* **5**, S23 (2003)

« *Dynamics of a single vortex line in a Bose-Einstein condensate* ».

J. LÉONARD, M. WALHOUT, A.P. MOSK, T. MÜLLER, M. LEDUC, C. COHEN-TANNOUJJI, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 073203 (2003)

« *Giant helium dimers produced by photoassociation of ultracold metastable atoms* ».

C.F. ROOS, P. CREN, T. LAHAYE, J. DALIBARD and D. GUÉRY-ODELIN, *Laser Physics* **13**, 605 (2003)

« *Injection of a cold atomic beam into a magnetic guide* ».

C.F. ROOS, P. CREN, J. DALIBARD and D. GUÉRY-ODELIN, *Physica Scripta* **T105**, 19 (2003)

« *A source of cold atoms for a continuously loaded magnetic guide* ».

M. MODUGNO, L. PRICOUPEENKO, Y. CASTIN, *Eur. Phys. J. D* **22**, 235-257 (2003)

« *Bose-Einstein condensates with a bent vortex in rotating traps* ».

I. CARUSOTTO, Y. CASTIN, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 030401 (2003)

« *Condensate statistics in one-dimensional interacting Bose gases : exact results* ».

I. CARUSOTTO, Y. CASTIN, *Laser Physics* **13**, 509-516 (2003)

« *Exact reformulation of the bosonic many-body problem in terms of stochastic wavefunctions : convergence issues* ».

M. ARTONI, I. CARUSOTTO, *Phys. Rev. A* **67**, 011602 (2003)

« *In-situ velocity imaging of ultracold atoms using slow-light* ».

I. CARUSOTTO, Y. CASTIN, *New Journal of Physics* **5**, 91 (2003)

« *An exact reformulation of the Bose-Hubbard model in terms of a stochastic Gutzwiller ansatz* ».

M. ARTONI, I. CARUSOTTO, G.C. LA ROCCA, F. BASSANI, *Phys. Rev. E* **67**, 046609 (2003)

« *Vavilov-Cherenkov effect in a driven resonant medium* ».

D.S. PETROV, M.A. BARANOV, G.V. SHLYAPNIKOV, Phys. Rev. A **67**, 031601(R) (2003)

« *Superfluid transition in quasi2D Fermi gases* ».

F. CHEVY and S. STRINGARI, Phys. Rev. A **68**, 053601 (2003)

« *Kelvin modes of a fast rotating Bose-Einstein condensate* ».

F. CHEVY et E. RAPHAL, Europhys. Lett. **61**, p. 796 (2003)

« *Capillary-gravity waves : a "fixed-depth" analysis* ».

K. OKUMURA, F. CHEVY, C. CLANET, D. RICHARD, D. QUERE, Europhys. Lett. **62**, p. 237 (cond-mat/0212151) (2003)

« *Water spring : a model for bouncing drops* ».

M. MODUGNO, L. PRICOUPENKO, Y. CASTIN, Eur. Phys. J. D **22**, 235-257 (2003)

« *Bose-Einstein condensates with a bent vortex in rotating traps* ».

C. MORA, Y. CASTIN, Phys. Rev. A **67**, 053615 (2003)

« *Extension of Bogoliubov theory to quasicondensates* ».

H. MARION, F. PEREIRA DOS SANTOS, M. ABGRALL, S. ZHANG, Y. SORTAIS, S. BIZE, Y. MAKSIMOVIC, D. CALONICO, J. GRUENERT, C. MANDACHE, P. LEMONDE, G. SANTARELLI, P. LAURENT, A. CLAIRON, C. SALOMON, Phys. Rev. Lett. **90**, 150801 (2003)

« *Search for variations of fundamental constants using atomic fountain clocks* ».

T. BOURDEL, J. CUBIZOLLES, L. KHAYKOVICH, K. MAGALHAES, S. KOKKELMANS, G. SHLYAPNIKOV, C. SALOMON, Phys. Rev. Lett. **91**, 020402 (2003)

« *Measurement of interaction energy near a Feshbach resonance in a Lithium 6 Fermi gas* ».

J. CUBIZOLLES, T. BOURDEL, S. KOKKELMANS, G.V. SHLYAPNIKOV, C. SALOMON, Phys. Rev. Lett. **91**, 240401 (2003)

« *Production of Long-Lived Ultracold Li₂ Molecules from a Fermi gases* ».

T. LAHAYE, P. CREN, C.F. ROOS and D. GUÉRY-ODELIN, Comm. Nonlin. Sci. Num. **8** 315 (2003)

« *Propagation of guided cold atoms* ».

P. PEDRI, D. GUÉRY-ODELIN, S. STRINGARI, Phys. Rev. A. **68**, 043608 (2003)

« *Dynamics of a classical gas including dissipative and mean field effects* ».

J. LÉONARD, A.P. MOSK, M. WALHOUT, P. VAN DER STRATEN, M. LEDUC, C. COHEN-TANNOUDJI, Phys. Rev. A **69**, 032702 (2004)

« *Analysis of photoassociation spectra for giant helium dimers* ».

THÈSES

Jérémy LÉONARD, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI
Photo-association de l'hélium métastable au voisinage de la Condensation de Bose-Einstein et formation de dimères géants
 (21 novembre 2003)

Davide CALONICO, Thèse en co-tutelle de l'Université de Paris VI et du Politecnico di Torino (Italie)
Realizzazione di campioni atomici di frequenza a fontana di ^{133}Cs e ^{87}Rb , caratterizzazione metrologica e test sulla stabilità di costanti fondamentali
 (28 mars 2003)

Vincent BRETIN, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI
Rotations d'un condensat de Bose-Einstein
 (19 mars 2004)

Julien CUBIZOLLES, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI
Fermions et bosons dégénérés au voisinage d'une résonance de Feshbach : Production de molécules et solitons d'ondes de matière
 (22 juin 2004)

ACTIVITÉS DIVERSES — MISSIONS — CONFÉRENCES

Conférences invitées à des conférences internationales

- *Inauguration du BEC Research Centre*, Université de Trento, Italie, mars 2003.
- *Colloque FRISNO 7*, École de Physique des Houches, France, février 2003.
- *Centennial Celebration of the Spanish Royal Physical Society*, Madrid, Espagne, juillet 2003.
- *European Research Conferences on « Bose Einstein-Condensation »*, San Feliu, Espagne, septembre 2003.
- *3^e symposium en physique laser*, France Tech Russie 2003, Moscou, URSS, octobre 2003.
- *Conférence « Frontiers of Chemical Sciences : Research and Education in the Middle East »*, American Chemical Society, Malte, décembre 2003.
- *Conférence internationale « Forum 21 »*, Chantilly, France, mars 2004.

Conférences spéciales et commémoratives

- *The Werner Heisenberg lecture*, Carl Friedrich von Siemens Foundation, Munich, Allemagne, janvier 2003.
- *Symposium « Highlights in contemporary physics »*, à l'occasion du 70^e anniversaire de M. Nussenzveig, Université Fédérale de Rio de Janeiro, Brésil, mars 2003.

— *The Seo Nam Distinguished Lecture*, Seoul National University, Corée du Sud, avril 2003.

— *Année de la physique en Grèce*, à l'occasion du centenaire des Prix Nobel de Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie, Institut Français d'Athènes, Grèce, mai 2003.

— *The Distinguished Jortner Lectures*, Tel-Aviv University, Israël, mai 2004.

Séminaires

— Université Fédérale de Rio de Janeiro, Brésil, mars 2003.

— Université Nationale de Séoul, Corée du Sud, avril 2003.

— Institut Français d'Athènes, Grèce, mai 2003.

— Université Autonome de Barcelone, Espagne, mars 2004.

Conférences d'information scientifique

— *Rencontre scientifique « Le Prix Nobel au service de la vie »*, Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, novembre 2003.

— *Table ronde « Scientifiques et politiques ; une rencontre nécessaire »*, Forum Franco-Allemand, Paris, novembre 2003.

— *Rencontre avec des étudiants en classe de journalisme*, Centre de Formation des Journalistes, Paris, France, janvier 2004.

— *Inauguration du « Scientibus »*, Association Rechrasciences-CCSSTI, Limoges, France, janvier 2004.

— *Rencontre avec des lycéens*, Lycée de Reims, France, février 2004.

— *Conférence à la Faculté des Sciences*, Université de Picardie Jules Verne, France, mars 2004.

— *Conférence à la Société Catalane de physique*, Barcelone, Espagne, mars 2004.

RESPONSABILITÉS DIVERSES

Membre du forum d'initiative franco-indien, New-Delhi, octobre 2003.

DISTINCTIONS

Membre étranger de l'Académie des Sciences Brésilienne, janvier 2003.

Membre étranger de l'Académie des Sciences Russe, mai 2003.

Docteur Honoris Causa de l'Université de Tel-Aviv, Israël, mai 2004.

Commandeur dans l'Ordre de la Légion d'honneur, avril 2004.