

Académie des sciences

Séance solennelle de réception des Membres élus en 2003
15 juin 2004

Les atomes froids : du jeu à l'outil Jean Dalibard

L'étude des atomes et de leur couplage avec le rayonnement a fortement marqué la physique moderne. La théorie quantique, notre outil pour comprendre le monde microscopique, s'est développée grâce à la spectroscopie des systèmes simples, comme les atomes d'hydrogène et d'hélium.

Depuis une vingtaine d'années, l'attitude passive consistant à collecter les informations contenues dans la lumière émise par les atomes, a fait place à une démarche plus radicale, la manipulation des atomes par des faisceaux laser. Cette nouvelle approche permet de confiner des atomes pendant plusieurs minutes, voire plusieurs heures, dans des pièges électromagnétiques situés au centre d'une enceinte à vide. Ces atomes sont refroidis à des températures extrêmement basses, de l'ordre du microkelvin, soit 100 millions de fois moins que la température ordinaire.

Ce domaine de recherche a démarré comme un jeu. Les règles en sont simples : chaque atome peut absorber ou émettre des photons, et l'impulsion, l'énergie, le moment cinétique doivent être conservés lors de ces processus. Une fois ces règles posées, la tactique à suivre n'est limitée que par notre imagination. L'objectif est de contrôler le mieux possible notre assemblée de particules. Nous voulons diminuer son désordre pour la faire basculer dans un régime où les règles quantiques deviennent essentielles, où le caractère ondulatoire de la matière domine son aspect corpusculaire habituel.

La pression de radiation est la plus simple des forces à notre disposition. Son existence avait été pressentie par Kepler pour expliquer l'orientation de la queue des comètes par rapport au soleil : la lumière pousse les particules qu'elle éclaire, comme le ferait un courant d'air. Pour nos atomes, cette force est considérable. Ainsi, en 1985, dans une expérience menée dans le groupe de Bill Phillips et à laquelle j'ai eu la chance de participer, nous avons observé les premiers atomes arrêtés. Ces atomes sortaient d'un four à une vitesse de 1000 mètres par seconde, et un mètre plus loin, simplement en les éclairant « à contre-courant » par un faisceau laser, nous les avons immobilisés !

Un atome est un objet simple, mais pas élémentaire. Le jeu est donc beaucoup plus riche qu'il n'y paraît au premier abord. Un de mes meilleurs souvenirs de recherche reste le moment où j'ai participé, avec Claude Cohen-Tannoudji, à l'élaboration du refroidissement "Sisyphé" : un atome est placé dans la situation du malheureux héros, condamné à pousser sans cesse son rocher vers le sommet d'une montagne. De même, notre atome monte des collines de potentiel ; quand il arrive en haut, son état interne change, il se retrouve au fond d'une vallée, et il repart pour une nouvelle ascension. Rapidement, son énergie diminue, et l'atome est finalement piégé au fond d'un creux de potentiel. A la joie d'avoir prédit cet effet, j'ai eu la chance de pouvoir y associer le plaisir de l'observer expérimentalement, en compagnie d'Alain Aspect et Christophe Salomon. C'est en effet un des points forts de cette activité

scientifique d'avoir la possibilité de contribuer aussi bien au développement des idées théoriques, qu'à leur mise en pratique au laboratoire.

Cette manipulation des atomes nous rend beaucoup plus familière la mécanique quantique, nous donnant ainsi un certain avantage sur ses pères fondateurs. Schrödinger a déclaré dans un texte resté célèbre que les sauts quantiques devaient rester un concept abstrait ; même si on envisageait parfois des expériences de pensée menées avec une particule unique, Schrödinger expliquait que ceci ne devait pas être pris trop au sérieux, car cela aurait des "conséquences ridicules". Or, on peut désormais travailler avec des atomes uniques, et la modélisation de ce type d'expériences nous conduit forcément à reprendre les principes de la théorie quantique, non pour les contredire, mais pour les regarder sous un autre angle. Ainsi, en collaboration avec Yvan Castin et Klaus Moelmer, nous avons proposé il y a une dizaine d'années une nouvelle approche baptisée *méthode des fonctions d'onde Monte-Carlo* : plutôt que regarder les observables moyennes d'une grande collection d'objets, nous nous sommes intéressés à ce qui arrive à un système unique, sur lequel on effectue des mesures répétées. Il en est sorti une nouvelle méthode pour étudier la dissipation en mécanique quantique, fournissant à la fois un éclairage original et une technique numérique performante.

En une période où les chercheurs sont poliment, mais fermement, conviés à justifier leur rôle dans la société, je ne voudrais pas donner l'impression que cette recherche n'est que ludique. Les atomes froids constituent désormais un outil puissant pour de nombreuses applications. Je n'en présente ici que quelques-unes, représentatives de la diversité de ce champ de recherche.

Ces atomes froids sont d'abord la base d'une nouvelle métrologie du temps et des fréquences. Un atome presque immobile peut être sondé pendant une longue durée, et la précision des mesures qu'on fait au sein des horloges atomiques en est considérablement augmentée. On dispose désormais de standards de temps d'une stabilité de 10^{-15} : avec cette précision, une horloge fonctionnant depuis la naissance de l'Univers n'aurait pris que quelques minutes de retard ! Cette stabilité est de fait utile dans la vie quotidienne, que ce soit pour la navigation assistée par GPS ou pour les télécommunications à très haut débit.

Le deuxième impact de ces techniques de manipulation de particules par laser se situe dans le domaine des pinces optiques, qui permettent de saisir des objets microscopiques. Le premier à l'avoir pressenti est Arthur Ashkin, un des pionniers de la manipulation des atomes par laser. Un jour de 1985, il s'est précipité vers son voisin des Bell Labs, Steve Chu, en s'exclamant "j'ai piégé de la vie !". C'était une bactérie confinée au foyer de son faisceau laser, au centre d'une éprouvette contenant de l'eau du robinet. Depuis, ces pinces sont couramment utilisées en biophysique pour manipuler et pour étirer de longues molécules comme l'ADN.

Le dernier aspect que je voudrais signaler ici porte sur l'utilisation des atomes froids pour modéliser des systèmes complexes. Par exemple, les condensats de Bose-Einstein atomiques ont permis de tester des théories initialement développées pour étudier l'hélium superfluide. Les tourbillons observés dans ces assemblées d'atomes froids en rotation semblent ouvrir une porte vers l'effet Hall quantique, une des grandes percées de la physique des vingt dernières années. L'étude des atomes fermioniques ultra-froids peut quant à elle établir une passerelle vers la physique des matériaux supra-conducteurs.

Je terminerai ce bref exposé en évoquant la beauté des images que ces expériences nous fournissent. Une de nos plus belles récompenses est l'émerveillement de nos visiteurs quand ils voient à l'œil nu cette assemblée d'atomes quasi immobiles, à une température 100

millions de fois plus basse que la température ordinaire. Une journaliste venue nous rendre visite qualifia un jour ces atomes suspendus dans le vide "d'ectoplasme", et il est vrai que ces nuages de particules ont souvent un aspect mystérieux et fantomatique. Le plaisir de les comprendre, de les "apprivoiser", n'en est que plus intense.