



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Séance solennelle de l'Académie des sciences / 16 juin 2009
Réception des nouveaux Membres sous la coupole de l'Institut de France

Des lasers aux interféromètres atomiques : question de recul et affaire de cohérence
Christian Bordé

Il y aura bientôt cinquante ans que le premier rayon laser a jailli d'un cristal de rubis. C'est cette lumière des lasers qui m'a attiré tel un papillon vers la recherche. Je dois à Alfred Kastler de m'avoir orienté vers le laboratoire de Gilbert Amat où venaient de naître les premiers lasers moléculaires, à gaz carbonique en particulier. En quelques mois la puissance de ces lasers est passée du milliwatt au kilowatt. Je me souviens qu'après avoir grillé les premiers détecteurs je mesurais leur puissance en nombre de lames de rasoir puis de lames de scie que l'on pouvait découper. Un an plus tôt le film Goldfinger avait anticipé cette possibilité avec un James Bond allongé sur une table à découper. Mes propres victimes furent plutôt d'innocentes molécules. Ce fut le début de la photochimie laser.

Ces premiers lasers étaient très instables ; il fallut apprendre à les domestiquer et pour cela en comprendre toute la physique. Une théorie des lasers à gaz venait d'être publiée par le prix Nobel américain Willis Lamb et elle prédisait un curieux phénomène : le Lamb dip, une réduction brutale de la puissance au voisinage de l'accord avec la transition atomique. Cette résonance était très étroite et exempte de l'élargissement Doppler qui affecte en général toutes les raies spectrales que ce soit en émission ou en absorption. La présence de deux ondes se propageant en sens opposés dans la cavité laser suffit pour sélectionner les atomes ne présentant pas de décalage Doppler. J'ai pu montrer que ce phénomène se manifestait bien pour les lasers moléculaires et qu'il permettait d'asservir la fréquence du laser en la calant au centre de cette résonance. Le problème de la stabilisation des lasers trouvait ainsi une solution très satisfaisante et très générale. L'idée s'est imposée immédiatement de transposer la méthode en spectroscopie d'absorption qui butait depuis longtemps sur cette largeur Doppler et en quelques années le pouvoir de résolution c'est-à-dire la capacité à résoudre des détails dans le spectre fut multiplié par un million. Au fil de ce progrès nous avons pu découvrir avec émerveillement les subtiles partitions que nous jouaient les atomes à l'intérieur des molécules: derrière la structure fine de vibration-rotation nous avons découvert une structure superfine puis hyperfine puis superhyperfine, véritable musique des sphères liée au ballet des atomes dans les toupies symétriques telles que l'ammoniac ou les toupies sphériques comme le méthane ou les hexafluorures.

Il y avait un autre défi à relever : celui de voir les molécules reculer en bloc lors de l'émission ou de l'absorption des photons laser tout comme le fusil recule lors de l'émission d'une balle. La théorie prévoyait un dédoublement de chaque raie égal au cent milliardième de la fréquence laser. Pour observer une telle structure il fallait que les molécules pussent suivre l'oscillation laser pendant un temps très long et pour cela agrandir considérablement les faisceaux laser. Cela m'a permis, en collaboration avec le prix Nobel américain Jan Hall, d'observer cet échange extrêmement précis d'impulsion entre laser et molécules.

Pour bien comprendre ce phénomène de recul il faut considérer le mouvement des atomes ou des molécules non plus comme celui d'un objet classique, une bille, mais comme celui d'une onde, l'onde de de Broglie. L'effet du laser sur cette onde atomique est de la séparer en une onde défléchie et une onde transmise, tout comme une lame semi-réfléchissante, une glace sans tain, peut séparer la lumière en deux. Ici les rôles sont simplement inversés entre lumière et matière : c'est le laser qui divise en

deux l'onde atomique. Cette séparatrice est cohérente en ce sens qu'elle ne brouille pas les ondes atomiques et cela a ouvert la voie à la réalisation d'interféromètres atomiques. Une séparatrice crée deux ondes, une autre les recombine. Lorsque les deux ondes se rencontrent à nouveau elles peuvent se renforcer si les crêtes de l'une se superposent aux crêtes de l'autre : on a une interférence constructive. Elles peuvent au contraire se compenser si les creux de l'une coïncident avec les maxima de l'autre : on a une interférence destructive. À cause du très grand nombre d'oscillations de l'onde dans l'espace, une toute petite différence de chemin entre les deux trajets offerts à l'onde va résulter en une variation importante de l'intensité à la sortie de l'interféromètre. Par exemple une toute petite rotation est facilement détectable et ce sont déjà des interféromètres laser qui permettent de faire naviguer les avions.

Pourquoi vouloir remplacer la lumière par une onde atomique ? Tout simplement parce que l'énergie contenue dans chaque atome est plus grande que l'énergie d'un photon par un facteur cent milliards et que ce facteur entre directement dans la sensibilité des interféromètres aux propriétés de l'espace-temps. La possibilité de mesures beaucoup plus précises permet des applications immédiates à la navigation des sous-marins, à la mesure de la rotation terrestre ou de la tectonique des plaques. De même les accélérations et en particulier celle de la pesanteur sont mesurées avec une très grande exactitude, rendant possible de suivre le détail des marées terrestres ou des tremblements de terre et de faire de la prospection minière. Enfin plusieurs effets de relativité générale deviennent accessibles, peut-être même la détection des ondes de gravitation.

Les assemblages d'atomes que sont les molécules sont aussi capables d'interférer comme je l'ai montré pour la première fois avec la molécule d'iode. Notre collègue Anton Zeilinger a poursuivi l'exploration de cette frontière entre le monde quantique et le monde classique avec des molécules de plus en plus grosses.

L'interférométrie atomique a bien d'autres applications comme la détermination précise des masses des atomes ou encore la réalisation d'horloges. Il suffit de prendre des atomes dans un état interne différent sur chacun des deux trajets. Les horloges optiques que l'on sait ainsi réaliser sont maintenant bien meilleures que les horloges micro-ondes qui définissent l'unité de temps et on est obligé de repenser aujourd'hui la définition de la seconde.

Au cœur de ma recherche il y a ce désir de synthèse entre la dynamique interne des atomes ou des molécules qui est source du temps propre et le mouvement externe des atomes qui sonde l'espace-temps dans une approche quantique unifiée. La mécanique quantique reste encore bien mystérieuse mais elle envahit peu à peu notre échelle humaine grâce à cette métrologie quantique en plein développement. À un bout de la chaîne ces recherches sont enracinées dans l'héritage de de Broglie et d'Einstein. À l'autre, elles conduisent à de nouveaux outils pour l'exploration du monde et pas seulement sur Terre car à en juger par la multiplication des projets de missions spatiales qui les proposent, leur avenir est aussi dans l'Espace.