



Cérémonie du 29 mai 2018

Allocution de Christophe Salomon
Atomes ultra-froids : de la mesure du temps à la superfluidité

Élu dans la section de Physique

Chères Consœurs, chers Confrères,

C'est un immense honneur et un immense plaisir que vous me faites en m'accueillant au sein de votre Académie. Au cours de ses trois siècles et demi d'existence, cette institution a vu défiler de si grands scientifiques que cette cérémonie en est quelque peu impressionnante et émouvante !

Aujourd'hui, je voudrais vous présenter mon parcours, celui d'un scientifique fasciné par la physique quantique et les applications des atomes manipulés par la lumière. A la suite de ma thèse réalisée dans l'équipe de Christian Bordé et stimulé par les travaux d'Arthur Ashkin aux *Bell laboratories* qui piégeait des petites billes de verre et même des bactéries à l'aide d'un faisceau laser, je me suis dirigé pour mon post-doc vers le laboratoire de Jan Hall aux USA qui venait tout juste de produire des atomes ralentis et même stoppés par la lumière laser.

C'est sur une plage lors d'une conférence à Hawaï en 1985, les pieds dans l'eau, qu'Alain Aspect m'a convaincu de rejoindre le groupe expérimental qui se montait à l'Ecole normale supérieure autour de Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard et lui-même, pour mener des expériences sur le refroidissement et le piégeage par laser. Ce fut le début d'une aventure merveilleuse !

Dans une enceinte à vide, les atomes absorbent les photons d'un faisceau laser et les réémettent par émission spontanée. Avec des lasers dans les 3 directions de l'espace il est possible de capturer et refroidir une assemblée d'atomes dans une mélasse optique. Les photons agissent sur les atomes comme un bain très visqueux qui amortit leur vitesse. Grâce à un mécanisme de refroidissement très efficace introduit par Claude et Jean, les atomes sont très lents. Pour le césium, la vitesse d'agitation désordonnée des atomes est de l'ordre du centimètre par seconde, dix mille fois plus faible qu'à la température ambiante.



Nous entreprîmes alors, avec l'aide d'André Clairon du LNE-SYRTE à qui je tiens à rendre un hommage particulier aujourd'hui, de montrer que le contrôle du mouvement des atomes pouvait conduire à la réalisation d'horloges atomiques bien plus précises.

La raison en est simple : des atomes très lents peuvent être observés longtemps et mesurés avec une précision accrue. Aujourd'hui, l'unité de temps, la seconde, n'est plus donnée par la rotation de la terre ou les oscillations d'un pendule mais par des horloges à césium, justement ces atomes que l'on sait si bien refroidir par laser. Les oscillations du pendule sont remplacées par les oscillations d'un champ électromagnétique qui portent l'atome dans une superposition de deux états d'énergie. Ces oscillations sont bien plus rapides que celles d'un pendule qui bat au rythme d'un tic-tac par seconde. Dans une horloge à césium, il se produit environ 9 milliards d'oscillations par seconde.

Lorsque l'on coupe les faisceaux laser de refroidissement pour faire fonctionner l'horloge, les atomes tombent simplement sous l'action de la gravité ! Une solution élégante à ce problème fut proposée en 1953 par J. Zacharias. C'est la fontaine atomique que nous avons réalisée en 1991 à l'Ecole Normale avec le césium. Les atomes sont lancés vers le haut par les faisceaux laser ; ils traversent une première fois une zone d'interaction où ils sont excités par un champ micro-onde; sous l'effet de la pesanteur, les atomes ralentissent, font demi-tour et traversent une seconde fois le champ excitateur.

Dans ce processus, le temps effectif de mesure est le temps que passent les atomes au-dessus de la cavité, typiquement une demi-seconde. Cette durée est cent fois plus longue que dans les horloges traditionnelles et le gain en précision de l'horloge est également d'un facteur 100. Aujourd'hui, l'erreur résiduelle des horloges en fontaine n'est que d'une seconde tous les 300 millions d'années. Ainsi, les trois fontaines de l'observatoire de Paris contribuent actuellement pour plus de 40% au pilotage du Temps Atomique International (le TAI) et les chercheurs travaillent aujourd'hui sur des horloges optiques encore plus précises !

Mais pourquoi diable s'acharner à améliorer la précision de la mesure du temps ? Tout d'abord la navigation par satellite (le GPS) utilise un ensemble d'horloges atomiques en orbite. Aujourd'hui, le GPS apporte une véritable révolution dans notre société moderne. Plus fondamentalement, ces instruments ultra-sensibles permettront de tester les prédictions théoriques de la relativité générale en comparant les fréquences de deux horloges à des



altitudes très différentes (le projet spatial PHARAO/ACES), dévoilant peut-être une nouvelle physique.

La seconde application que je voudrais vous présenter concerne la superfluidité des fermions ultra-froids. La Nature comporte deux types de particules, les bosons de spin total entier et les fermions de spin demi-entier. A basse température les bosons identiques sont grégaires et forment un condensat de Bose-Einstein, une phase superfluide où la viscosité est nulle. Pour les fermions de spin $1/2$, il faut une interaction attractive entre fermions de spins opposés pour qu'une condensation de paires vers un état superfluide se produise.

En réglant à volonté la force de cette attraction, notre équipe, et quelques équipes étrangères, ont pu établir un lien entre condensation de paires de fermions et condensation de Bose-Einstein, et mettre en évidence un régime universel entre ces deux limites.

Ce régime universel est atteint également dans des étoiles ultra-denses, les étoiles à neutrons, elles aussi superfluides. C'est ainsi qu'en menant des expériences sur des gaz très dilués, un million de fois moins denses que l'air qui nous entoure, on explore les propriétés d'objets astrophysiques exotiques qui sont mille milliards de fois plus denses que la Terre. C'est la beauté des équations de la physique quantique que de s'appliquer à des systèmes si disparates !

Je voudrais terminer cet exposé en remerciant tous les étudiants, post-docs, et chercheurs avec qui j'ai eu la chance de partager cette aventure. Je remercie également de tout cœur les membres de ma famille pour leurs encouragements continuels.

Merci à tous pour votre attention.