

La physique quantique a élargi notre vision du monde et suscité de multiples découvertes qui, du transistor au laser, ont bouleversé notre vie; au XXI^e siècle, cette exploration s'amplifiera et contribuera de façon majeure à notre environnement technique. La physique des atomes froids est une magnifique réussite qui estompe les barrières entre physique fondamentale et physique appliquée, les nouvelles propriétés découvertes offrant une perspective pour des outils prometteurs. Cette recherche où les propriétés quantiques de la matière sont exacerbées, est le prolongement vivace et fructueux d'une longue tradition de physique atomique de haut niveau en France; elle a été personnifiée, entre autres, par les prix Nobel d'Alfred Kastler en 1966 et de Claude Cohen-Tannoudji en 1997.

Indépendance de la pensée et mise en commun des idées

Alfred Kastler, avec Jean Brossel, a été le pionnier des recherches sur les inversions de populations des atomes qui ont permis le laser. Claude Cohen-Tannoudji et ses collègues du laboratoire Kastler-Brossel ont travaillé sur la théorie du ralentissement, du refroidissement et du piégeage des atomes par la lumière.

Pendant longtemps les propriétés quantiques n'ont pu être observées que sur des moyennes; les conséquences des lois régissant les électrons et les photons portaient sur des comportements d'ensembles gigantesques de particules (de l'ordre du nombre d'Avogadro, 10^{24}). C'était le domaine de la physique du solide, des liquides superfluides, des cristaux supraconducteurs. Aujourd'hui le refroidissement et le piégeage des atomes permettent de mettre en évidence des propriétés quantiques sur des atomes isolés et de réaliser des expériences de pensées dont la réalisation était inenvisageable à l'époque d'Einstein. En outre, il devient possible d'observer des comportements collectifs prédits par la mécanique quantique pour de petits nuages dilués d'atomes, en particulier la condensation de Bose-Einstein.

Ces petits nuages de gaz, comportent moins d'un milliard d'atomes. Ils lèvitent, sont confinés par la lumière laser et refroidis à des températures de quelques milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu.

Le but de l'*Institut Francilien de Recherche sur les Atomes Froids*, lancé en 2005, est de fédérer les recherches sur cet état de la matière.

Réflexion individuelle et démarche collective

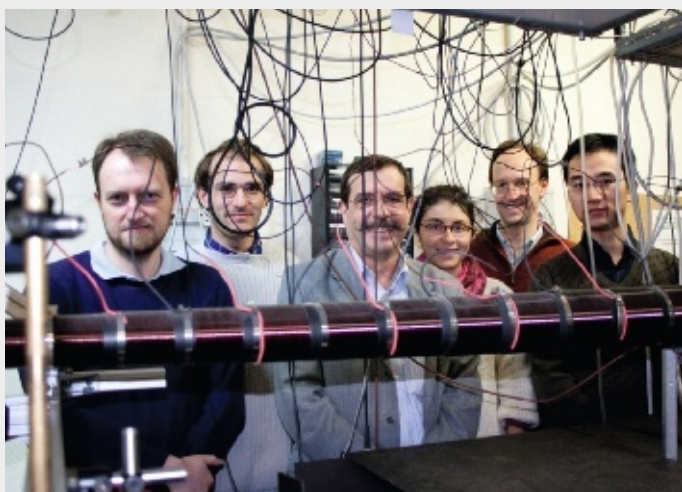
Donnons la parole aux acteurs de la recherche comme ils se sont exprimés dans le livre de Jean-François Dars et Anne Papillault, *Le plus grand des hasards, Surprises quantiques*, 2010, Éditions Belin.

« Les atomes froids, a dit Claude Cohen-Tannoudji, sont devenus des outils privilégiés pour la recherche. Ils permettent des tests très sévères des théories fondamentales, telles que la relativité générale, et ouvrent de nouveaux champs comme l'interférométrie atomique, les molécules ultra-froides, les gaz quantiques dégénérés. L'IFRAF contribuera de manière essentielle au développement de cette aventure scientifique. » Pour William Phillips, prix Nobel de Physique, « la meilleure façon d'apprendre est de travailler avec des gens de qualité... Certaines de mes meilleures occasions d'apprendre ont résulté de ma capacité à contaminer les autres par ma propre confusion, ou lors d'un violent désaccord avec mes collègues sur un point de physique: j'ai la conviction que lorsqu'il s'agit de physique, il y a une réponse ».

La physique quantique est dépeinte comme énigmatique et Antoine Georges témoigne de cette fascinante difficulté: « Comme tout serait facile si nous autres, physiciens quantiques, pouvions accéder à ce monde secret avec l'évidence de nos sens. Au lieu de cela, il nous faut construire des appareils sophistiqués, effectuer des calculs com-

“ Le critère incontournable de la valeur d'une théorie physique est la propriété étonnante de receler plus de richesses que ce qu'on y avait mis. ”

Alain Aspect



Denis Boiron, Aurélien Perrin, Alain Aspect, Valentina Krachmalnicoff, Chris Westbrook, Hong Chang



William D. Phillips exprimant des idées et des doutes fertiles devant Juliette Simonet

pliqués, ou tenter de deviner en presque aveugles ces secrets qui, pour la nature elle-même, vont de soi. »

Ce compagnonnage se prolonge dans les réalisations expérimentales qui confirment la réalité des surprises que l'esprit a quelques difficultés à entrevoir.

La visite de la Sainte Chapelle

« Ces surprises jubilatoires face à l'univers quantique se retrouvent lors de l'enseignement de cette discipline. La marche d'approche n'est certes pas des plus aisées : si l'apprentissage d'une théorie physique peut se comparer à la découverte d'un monument, celui de la mécanique quantique ressemble davantage à la visite de la Sainte Chapelle qu'à celle du château de Versailles. On ne découvre ses richesses qu'après avoir traversé des cours étroites et des salles basses. Mais une fois sur place, les élèves se piquent au jeu et rivalisent d'inventivité pour trouver de nouveaux tours, tentant de déterminer furtivement si la particule est à droite ou à gauche, voire de téléporter leurs camarades » remarque Jean Dalibard.

La physique expérimentale a ses réalités. Juliette Simonet a illustré cette tâche par le maniement de l'outil : « Aujourd'hui je suis en dernière année de thèse et je manie beaucoup la clé de 13 (par exemple pour changer une pompe).... L'expérimentation a un impact important sur la théorie, non seulement pour la vérifier, mais aussi pour simuler au laboratoire des problèmes non solubles numériquement. »

Pour quoi faire ?

La physique fondamentale crée ses propres instruments d'action. Écoutez Christian Bordé : « 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. »

L'IFFRAF est un réseau de 33 équipes de recherche toutes associées au CNRS et réparties sur différents établissements : l'École normale supérieure, l'Observatoire de Paris, l'Institut d'Optique et les universités UPMC, Paris-Sud 11 et Paris-Nord 13. L'IFFRAF a également associé 8 équipes situées dans d'autres établissements. Son siège est à l'École normale supérieure, 45 rue d'Ulm, 75 231, Paris, Cedex 05.

Contact : leduc@lkb.ens.fr.

Les recherches à l'IFFRAF regroupent trois axes scientifiques :

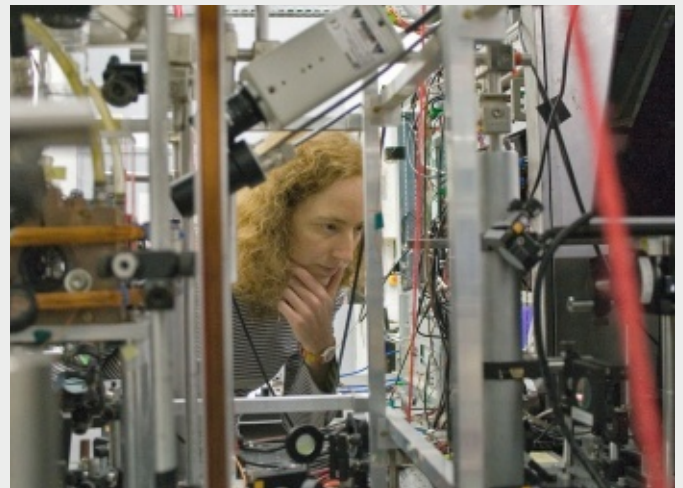
- Les gaz quantiques et les comportements collectifs dans les condensats de Bose-Einstein. Les atomes froids, bosons ou fermions, placés dans des potentiels optiques périodiques forment des systèmes modèles pour mieux comprendre la matière condensée. Ces études s'étendent aux molécules froides.
- La métrologie de précision. L'utilisation des atomes froids fait gagner plusieurs ordres de grandeur sur la précision des horloges, des gyro-mètres, des gravimètres et des capteurs inertiels pour le positionnement et la navigation. La miniaturisation sur des puces à atomes est en cours.
- L'information quantique. Les atomes froids isolés et piégés en petit nombre permettent d'envisager de nouveaux dispositifs fondés sur l'intrication entre particules (atome/atome ou atome /photon) destinés au stockage de l'information ou à la cryptographie quantique.

Dans les horloges atomiques « chefs-d'œuvre quantiques », le temps est mesuré comme l'inverse d'une fréquence, laquelle est elle-même liée à l'énergie de transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome. Ces horloges, toujours perfectionnées, sont les plus précises du monde (une seconde sur 100 millions d'années) et servent à la définition de la seconde. Pour Noël Dimarcq « Le spectre d'applications des horloges atomiques est extrêmement large. La synchronisation d'horloges est essentielle aux réseaux de télécommunications, aux observations astronomiques par les systèmes d'interférométrie à longue base ou à la navigation des sondes dans le Système solaire.

Cette amélioration des mesures viendra peut-être un jour contrarier des précisions supposées infaillibles. Tout physicien rêve de vivre une telle révolution associant l'amertume de la théorie abandonnée à l'excitation des domaines à découvrir. »



Yvan Castin, Michèle Leduc, David Guéry-Odelin, Claude Cohen-Tannoudji



Hélène Perrin s'interrogeant sur la marche de l'expérience