

*Fiche 3*

## Optique atomique, condensats de Bose-Einstein, et lasers à atomes

En 1992, grâce au soutien du CNRS, Alain Aspect fonde à l'Institut d'Optique d'Orsay le groupe d'optique atomique, avec Nathalie Westbrook et Robin Kaiser, puis Christoph Westbrook. L'optique atomique est un champ de recherche nouveau qui vise à utiliser les forces exercées par les lasers sur les atomes, pour contrôler les trajectoires atomiques, comme l'optique traditionnelle sait contrôler les rayons lumineux à l'aide de miroirs ou de lentilles. De 1992 à 1996, le groupe d'optique atomique réalise une série d'expériences qui montrent les possibilités – mais aussi les limites – des miroirs atomiques à ondes lumineuses dites « évanescentes », dans lesquels les atomes rebondissent sur une nappe de lumière, obtenue par réflexion totale de l'onde lumineuse issue d'un laser à l'intérieur d'un prisme de verre.

Selon la théorie quantique, les atomes, que l'intuition nous conduit à considérer comme des particules, ont aussi des propriétés ondulatoires (à toute particule on peut associer une onde, comme l'avait prédit Louis de Broglie). On peut donc, comme pour la lumière, observer le phénomène de diffraction atomique<sup>5</sup>, étudié par Alain Aspect et ses collaborateurs avec des miroirs à atomes de profil ondulé. Ce phénomène permet d'analyser la rugosité de la surface du prisme avec une sensibilité meilleure que le nanomètre (un milliardième de mètre).

La nature ondulatoire des atomes autorise aussi le développement d'interféromètres atomiques, par exemple suivant un schéma proposé par Christian Bordé (Laboratoire de physique des lasers<sup>6</sup> et laboratoire Systèmes de référence Temps-Espace SYRTE<sup>7</sup>). Les franges d'interférence<sup>8</sup> ainsi obtenues sont remarquablement sensibles aux effets gravitationnels (attraction exercée par toute masse, à commencer par la terre) ou inertiels (accélération ou rotation absolue, par rapport aux « étoiles fixes »). Les interféromètres atomiques offrent donc des perspectives d'applications aussi bien en physique fondamentale (tests d'effets de relativité générale), que dans le domaine de l'exploration du sous-sol (par mesure des irrégularités de la pesanteur), mais aussi en navigation inertielle. Les plateformes de navigation inertielle permettent à un véhicule, par exemple un avion ou un navire, de déterminer sa trajectoire sans aucune observation externe, de façon à ne pas être à la merci d'une défaillance éventuelle des systèmes de localisation par radiobalise ou par satellite. Le capteur inertielle à atomes froids en construction au laboratoire SYRTE (en collaboration avec le groupe d'optique atomique du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique) offrira une précision supérieure à celui des gyrolasers actuellement en service sur les avions commerciaux.

Suite à la découverte des condensats de Bose-Einstein gazeux en 1995 (voir fiche 2), le groupe d'optique atomique, renforcé par Philippe Bouyer, s'est lancé dans l'étude de ces

---

<sup>5</sup> La diffraction est l'écart à la propagation suivant des rayons. Elle se manifeste lorsque l'onde rencontre un obstacle dont la dimension est de l'ordre de la longueur d'onde (pour la lumière visible, la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 0,8 micromètre ; pour les ondes de matière utilisées dans ces expériences, la longueur d'onde est de quelques nanomètres). D'abord observé pour la lumière, le phénomène de diffraction se manifeste pour toutes les ondes, y compris les ondes de matière (ou ondes de Broglie) associées en physique quantique aux électrons, neutrons, atomes, molécules...

<sup>6</sup> CNRS/Université Paris XIII

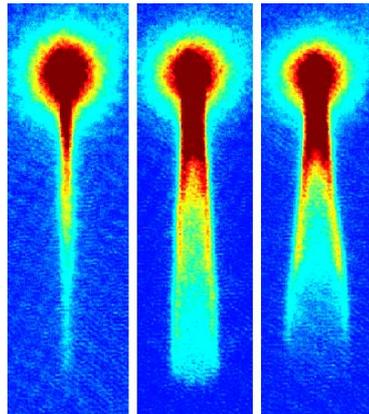
<sup>7</sup> Observatoire de Paris/CNRS/Université Paris VI

<sup>8</sup> Les interférences sont des phénomènes résultant de la superposition d'ondes de même nature et de fréquence égale. Pour les ondes lumineuses, les interférences se manifestent par des bandes étroites alternativement brillantes et sombres. Le phénomène existe en fait pour toutes les ondes, y compris les ondes de matière (ondes de Broglie).

nouveaux systèmes. Dans un condensat de Bose-Einstein, système envisagé théoriquement par Einstein en 1924 à la suite des travaux de Bose sur les photons, les atomes sont tous décrits par la même fonction d'onde quantique. Ce phénomène est à la base de la superfluidité de l'hélium ou de la supraconductivité des métaux observés à basse température. Mais la situation évoque aussi l'effet laser, où tous les photons sont décrits par la même onde électromagnétique. C'est pourquoi il devient possible de réaliser des *lasers à atomes*, faisceaux d'atomes très directs et cohérents (leurs fonctions d'onde vibrent toutes « à l'unisson »). Grâce à ces propriétés, les lasers à atomes pourraient révolutionner l'optique atomique et ses applications, comme les lasers photoniques ont révolutionné l'optique traditionnelle après leur découverte en 1960.

Parmi les résultats marquants du groupe d'optique atomique d'Orsay, on peut citer :

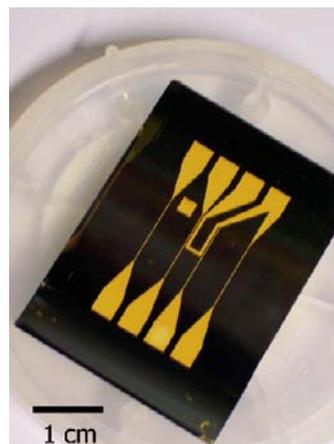
- L'étude de lasers à atomes, c'est à dire d'atomes qui se propagent en restant tous dans la même fonction d'onde quantique.



**Lasers à atomes.** La figure montre plusieurs faisceaux de laser à atomes, de quelques millimètres de long, plus ou moins collimatés. On les obtient en laissant fuir les atomes à partir d'un condensat de Bose-Einstein piégé dans un appareil analogue à celui utilisé pour la condensation de Bose-Einstein de l'hélium métastable (ci-dessous). ©Groupe d'optique atomique / LCFIO

- La mesure des fluctuations de phase des condensats de Bose-Einstein très allongés ou « quasi condensats ». La compréhension de ces fluctuations est cruciale en vue de l'utilisation des condensats en optique atomique guidée. En permettant la simplification des dispositifs, l'optique atomique guidée, en particulier sur puce atomique, ouvre des perspectives d'application hors des laboratoires de recherche.

- La production et l'étude de micro condensats de Bose-Einstein sur « puce atomique », dispositif de petite taille réalisé par les méthodes de nanofabrication utilisées en microélectronique ou en optoélectronique (collaboration avec le Laboratoire de photonique et nanostructures de Marcoussis).

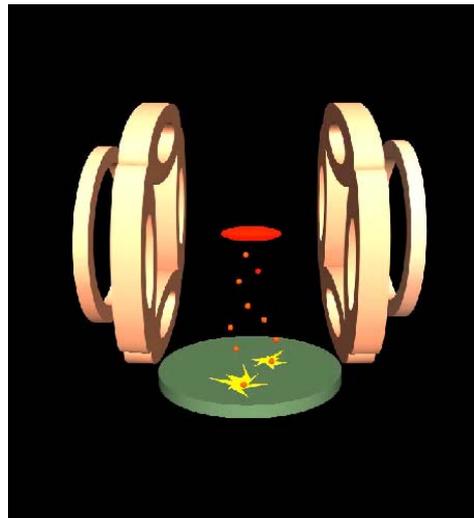


**Puce atomique** (collaboration LCFIO-LPN). Les fils d'or au centre, de taille micrométrique, déposés sur un substrat de silicium, permettent de piéger et de guider les atomes ultra-froids, et de les condenser. En miniaturisant ainsi les expériences de laboratoire, on peut favoriser le développement des applications des atomes ultra froids. ©Groupe d'optique atomique / LCFIO

- L'obtention en 2001 du premier condensat de Bose-Einstein d'hélium métastable a priori paradoxale, puisque ces atomes sont susceptibles de se désexciter en libérant une énergie dont une infime fraction suffirait à réchauffer suffisamment le condensat pour lui faire perdre sa cohérence et le transformer en gaz thermique ordinaire.

Pour leurs recherches sur la condensation de Bose-Einstein de l'hélium métastable, les chercheurs du groupe d'optique atomique ont développé une instrumentation permettant de détecter ces atomes un par un, en déterminant avec précision la position et l'instant de détection.

Cette possibilité ouvre la voie à des développements fascinants en *optique quantique atomique*, comme le développement dans les années 1950 des techniques de comptage de photons, avait ouvert la voie à l'optique quantique (photonique) moderne. Ainsi, le groupe d'optique atomique vient de mettre en évidence l'effet de groupement d'atomes, analogue au « groupement de photons » découvert à la fin des années 1950 et connu sous le nom d'effet « Hanbury-Brown et Twiss »<sup>9</sup>. Les projets du groupe d'optique atomique dans le domaine de l'optique quantique atomique portent notamment sur les paires d'atomes jumeaux intriqués, analogues des photons jumeaux intriqués étudiés au début des années 1980.



**Schéma de l'appareil pour condensation de Bose-Einstein de l'hélium métastable.** Les bobines parcourues par des courants permettent de piéger un nuage d'atomes ultra-froids (ellipsoïde rouge). Si on refroidit ces atomes en dessous de 1 microKelvin (à moins de un millionième de degré du zéro absolu), on obtient un condensat de Bose-Einstein, c'est à dire un ensemble d'atomes tous décrits par la même fonction d'onde. Le détecteur (représenté en vert) permet de détecter un par un les atomes relâchés du piège et tombant sous l'effet de la gravité. © Groupe d'optique atomique / LCFIO

---

<sup>9</sup> Des photons émis par une source incohérente ont tendance à être détectés ensemble alors qu'a priori ils sont indépendants (par exemple des photons émis aux deux extrémités d'un diamètre d'une étoile lointaine). C'est notamment en analysant cet effet que Roy Glauber (prix Nobel de physique 2005) a développé son formalisme à la base de l'optique quantique moderne.