

20 ans après sa prédiction théorique, première détection expérimentale d'une des phases topologiques, curiosité de la mécanique quantique

Les phases topologiques sont une des manifestations étranges de la mécanique quantique. Prédite théoriquement en 1993, la troisième phase de cette famille n'avait pas été observée jusqu'à ce jour. Grâce à un interféromètre à atomes de haute précision, une équipe de chercheurs du laboratoire Collisions Agrégats Réactivité (Université Toulouse III - Paul Sabatier / CNRS) vient d'en réaliser une première observation expérimentale et d'en vérifier ses caractéristiques. Ces travaux sont publiés le 15 juillet dans Physical Review Letters.

Deux faisceaux issus d'une même onde lumineuse et parcourant des chemins de longueurs différentes acquièrent une différence de phase. En recombinaison ces faisceaux, on crée une figure d'interférence dans laquelle l'intensité lumineuse, au lieu d'être uniforme, présente des modulations d'intensité.

Depuis les travaux du physicien français Louis de Broglie (prix Nobel 1929), on sait que la matière peut se comporter comme une onde. L'évolution de l'onde de matière, constituée d'atomes, est régie par les lois de la mécanique quantique. En particulier, les phénomènes d'interférence vont pouvoir être observés sur des ondes de matière comme sur des ondes lumineuses (fig.1). Mais en utilisant des ondes de matière, on va de plus accéder à des phénomènes spécifiquement quantiques inaccessibles aux interféromètres traditionnels. Les phases topologiques sont un exemple de tels phénomènes particulièrement intrigants. En mécanique classique, pas d'effet sans force. Mais en mécanique quantique, alors qu'aucune force ne s'exerce sur le système, la présence de ces phases peut complètement changer le résultat d'une mesure !

Contrairement à ce qui se passe dans le monde classique, la propagation d'une particule dans le monde quantique peut être perturbée, même en l'absence de force : cet effet étrange se manifeste par un déphasage dans une onde de matière et ne peut être détecté que par interférométrie entre de telles ondes. De la même manière qu'en optique, on peut aussi utiliser un interféromètre à atomes dans lequel on remplace l'onde lumineuse par un jet d'atomes et qui permet des mesures physiques de très haute précision.

Trois phases topologiques¹ ont été proposées théoriquement. Les deux premières ont pu être rapidement confirmées expérimentalement. Par contre, la troisième phase topologique prédite par les chercheurs He, McKellar et Wilkens en 1993-1994, n'avait pas été observée jusqu'à ce jour.

C'est chose faite désormais puisqu'en utilisant un interféromètre à atomes (fig.2), une équipe de recherche du laboratoire Collisions-Agrégats-Réactivité (Université Toulouse III - Paul Sabatier / CNRS) a mis en évidence expérimentalement cette troisième phase. L'interféromètre à atomes utilise des faisceaux lasers pour séparer en deux bras puis pour recombinaison les ondes d'atomes de Lithium. La particularité de cet interféromètre réside dans ces deux bras qui sont complètement séparés dans l'espace de façon à pouvoir disposer une électrode entre eux, ce qui est nécessaire pour induire la phase géométrique He-McKellar-Wilkens. Cette phase a pu alors être détectée lorsque l'onde ayant subi ce déphasage est recombinaisonnée avec l'onde de référence passée dans l'autre bras. Les mesures effectuées avec une très bonne précision témoignent d'un excellent accord entre la théorie et l'expérience. Les chercheurs ont également vérifié certaines des propriétés de cette phase, en particulier qu'elle est indépendante de la vitesse des atomes, ce qui constitue une propriété caractéristique des phases topologiques.

Les recherches dans ce domaine sont importantes car les phases topologiques sont susceptibles d'usages variés. Grâce à leur capacité à changer de signe avec le sens de propagation de l'atome, il est possible de construire une diode à atomes cohérente qui transmet l'onde de matière dans un sens et pas dans l'autre. De tels objets (isolateurs optiques) existent pour la lumière et ils jouent des rôles essentiels dans les expériences laser. Les phases topologiques permettront également d'effectuer des tests fondamentaux, tel que celui de la neutralité électrique de la matière, avec une précision considérablement améliorée.

Ces résultats contribuent donc à approfondir nos connaissances fondamentales à l'échelle de l'infiniment petit, à envisager de nouvelles applications et à affermir la validité des prédictions de la mécanique quantique, souvent étonnantes du fait de leur caractère contre-intuitif.

Note :

1. La première en 1959 par Aharonov et Bohm et dont l'existence fut confirmée rapidement par des expériences avec des électrons. La seconde, découverte par Aharonov et Casher en 1984, a été également observée par diverses expériences d'interférences utilisant des neutrons, des molécules et des atomes. La troisième est celle de He, McKellar et Wilkens.

Référence :

Measurement of the He-McKellar-Wilkins Topological Phase by Atom Interferometry and Test of Its Independence with Atom Velocity, J. Gillot, S. Lepoutre, A. Gauguet, M. Büchner, and J. Vigue, *Physical Review Letters*, 111.030401 (2013)

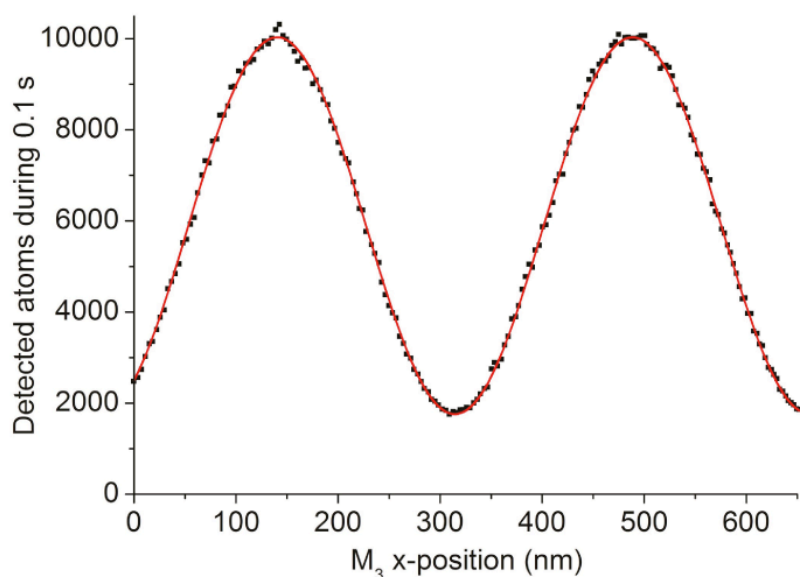


fig. 1 : franges d'interférences enregistrées en l'absence de toute perturbation - © LCAR-IRSAMC

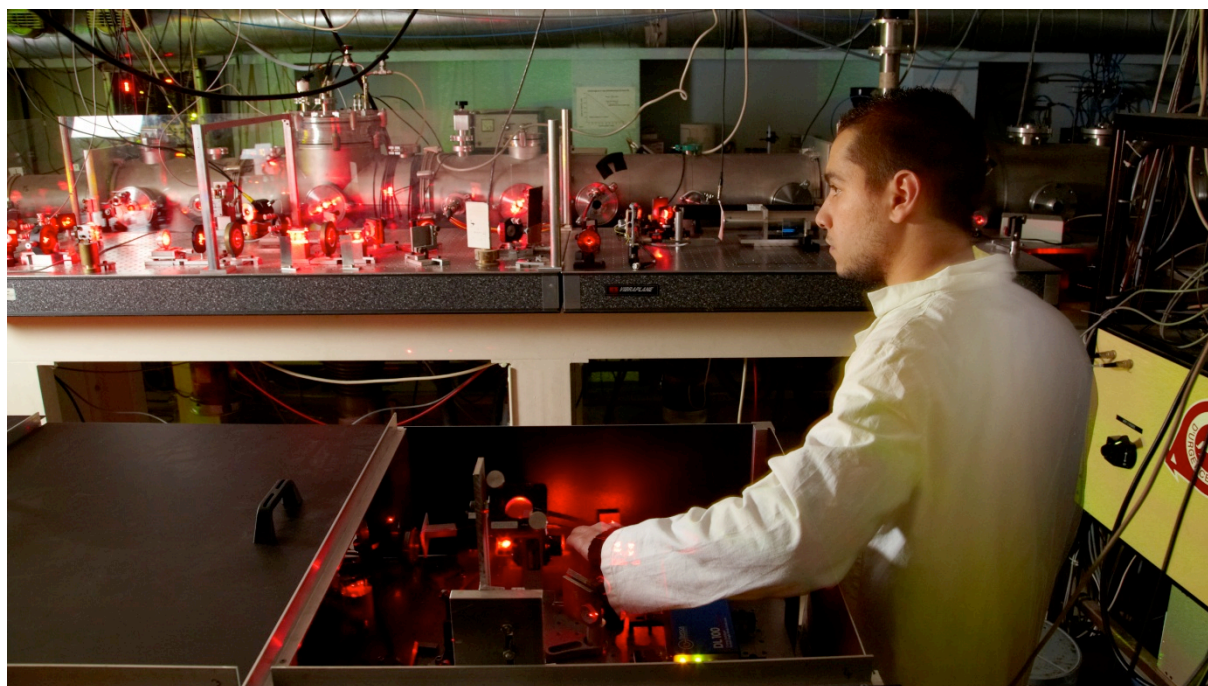


fig. 2 : interféromètre à atomes du LCAR - © Patrick Dumas/IRSAMC

Pour en savoir plus :

Le Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité (**LCAR**) est une unité mixte de recherche Université Toulouse III – Paul Sabatier / CNRS – UMR 5589 – <http://www.lcar.ups-tlse.fr>

Il est membre :

- de la fédération **IRSAMC** (Institut de Recherche sur les Systèmes Atomiques et Moléculaires Complexes – FR 2568 UPS/INSA/CNRS) – <http://www.irsamc.ups-tlse.fr>
- du LabEx **NEXT** (Nano, mesures EXtrêmes & Théorie) – <http://www.next-toulouse.fr>

Contacts :

Presse CNRS : Carine Desautly – 05 61 33 60 54 – 06 88 07 83 73 – Carine.Desautly@dr14.cnrs.fr

Presse UPS : Fanny Weiss – 05 61 55 72 82 – fanny.weiss@univ-tlse3.fr

Scientifique : Jacques Vigué – 05 61 55 83 20 – jacques.vigue@irsamc.ups-tlse.fr