

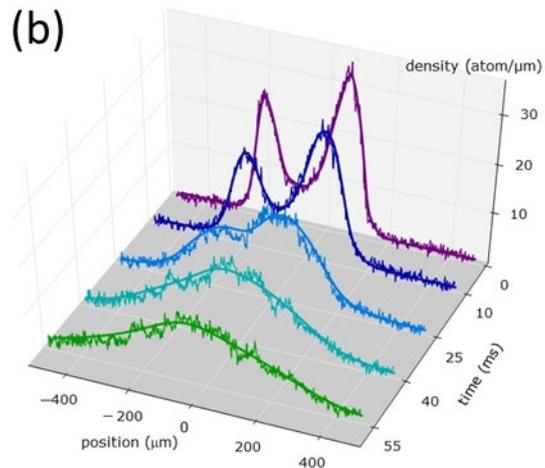
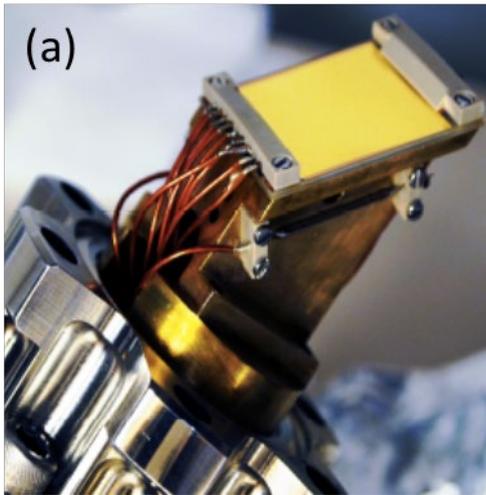
Une puce à atomes froids pour valider une nouvelle théorie des fluides quantiques

La description des systèmes quantiques à grand nombre de particules est un défi théorique et numérique. Une nouvelle théorie s'appliquant dans le cas unidimensionnel et généralisant une approche hydrodynamique vient d'être confirmée expérimentalement à l'aide d'atomes de rubidium piégés sur une puce.

Pour modéliser la dynamique d'un très grand nombre de particules, il faut le plus souvent renoncer à la description microscopique du mouvement de chaque particule. C'est le cas des fluides classiques qui sont modélisés de façon statistique en hydrodynamique à l'aide de grandeurs comme la densité, la température ou la vitesse, dont les valeurs sont moyennées localement grâce aux interactions entre les particules. À l'équilibre, on admet généralement que les valeurs moyennées dans l'espace sont égales aux valeurs moyennées dans sur des temps longs. C'est l'hypothèse ergodique. La description des systèmes quantiques à grand nombre de particules quant à elle est un défi posé aux théoriciens depuis plus de cinquante ans. Seuls des cas particuliers comme celui d'un ensemble de bosons à une dimension pouvant être résolus exactement. Récemment, une nouvelle théorie appelée hydrodynamique généralisée a été formulée¹. Elle concilie une description statistique et le non-respect de l'hypothèse ergodique qui caractérise ce gaz de bosons à une dimension. Dans ce travail, des physiciens du Laboratoire Charles Fabry (CNRS/IOGS) en collaboration avec des théoriciens du Laboratoire de physique et chimie théorique (CNRS/Univ. Lorraine) et du King's College de Londres viennent d'apporter la première preuve expérimentale de la validité de cette nouvelle théorie. En utilisant un gaz de plusieurs milliers d'atomes de rubidium piégés à très basse température et en étudiant l'évolution d'une configuration initialement perturbée de ces atomes, les chercheurs ont mesuré un comportement s'écartant d'une évolution hydrodynamique et en plein accord avec l'hydrodynamique généralisée. Fort de cette vérification, d'autres systèmes quantiques plus complexes ou d'autres régimes d'interactions pourraient être étudiés expérimentalement et confrontés à la théorie.

Dans cette expérience, les atomes de rubidium (⁸⁷Rb) refroidis sont piégés magnétiquement sur une puce et guidés le long d'une direction définie à l'aide de courants radiofréquences circulant dans des microfils électriques (figure a). Seuls les atomes les plus froids restent piégés et le nuage atomique atteint des températures inférieures au microkelvin. Des courants continus additionnels permettent de moduler le potentiel auquel sont soumis les atomes dans la direction du mouvement tout en gardant un confinement fort dans le plan perpendiculaire. Les interactions entre atomes sont répulsives, avec une longueur de corrélation des mouvements atomiques de l'ordre du dixième de micromètre, alors que la longueur du piège est de l'ordre du millimètre. Le profil de la densité du nuage le long de la direction du mouvement est mesuré par imagerie de l'absorption d'un faisceau laser par les atomes. Les mesures consistent à suivre l'évolution d'un nuage initialement en équilibre dans le potentiel fixé par les courants lorsque l'on coupe ce potentiel. Dans ce travail, les chercheurs ont réussi à contrôler finement et précisément les différents courants de façon à jouer avec différentes configurations de potentiel. Dans le cas où le potentiel est harmonique et où le nuage présente un maximum de densité, l'évolution du nuage est semblable en hydrodynamique conventionnelle et en hydrodynamique généralisée. Par contre dans le cas où le puits de potentiel est double et où le nuage présente deux maximums de densité, l'évolution du nuage suit la prédiction de l'hydrodynamique généralisée, qui s'écarte de celle de l'hydrodynamique conventionnelle (figure b). Cet écart peut se comprendre qualitativement par exemple par le fait que, au milieu des deux pics de densité, il y a coexistence d'atomes venant de la droite et de la gauche avec des vitesses opposées et correspondant donc à une distribution hors-équilibre qui n'est pas prise en compte par l'hydrodynamique conventionnelle.

¹ O. A. Castro-Alvaredo, B. Doyon, T. Yoshimura, Phys. Rev. X 6, 041065 (2016) and B. Bertini, M. Collura, J. De Nardis, M. Fagotti, Phys. Rev. Lett. 117, 207201 (2016).



(a) Photographie de la puce électronique utilisée pour créer le champ magnétique qui piège les atomes de rubidium et donne au nuage d'atomes une forme quasi-unidimensionnelle. Les fils électriques d'amenée des courants sont visibles. La puce est placée à l'intérieur d'une chambre sous un ultravide à 10^{-9} Pa (non visible sur l'image).

(b) Profils de densité du nuage atomique après expansion à partir d'un potentiel double-puits en une dimension (lignes bruitées) et comparaison avec la nouvelle théorie hydrodynamique généralisée (lignes lisses). Le nuage a initialement deux pics de densité aux deux minima du potentiel, puis ces deux pics s'étalent. La région entre les deux pics est alors occupée par des atomes provenant de chacun des deux pics, qui se déplacent à des vitesses très différentes de la vitesse moyenne. Une telle situation ne peut pas être décrite par la théorie hydrodynamique conventionnelle qui prévoit l'équilibration de ces atomes et la formation d'une onde de choc, qui n'est pas observée expérimentalement.

Bibliographie

Generalized Hydrodynamics on an Atom Chip. M. Schemmer, I. Bouchoule, B. Doyon et J. Dubail, *Physical Review Letters* **122**, 090601, 2019. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.090601
Article disponible sur les bases d'archives ouvertes **ArXiv** et **HAL**.

Contacts

Chercheur LPCT | Jérôme Dubail | jerome.dubail@univ-lorraine.fr
Communication INP | inp.com@cnrs.fr

