

Des atomes ultrafroids piégés dans des champs optiques superoscillants : vers de nouveaux simulateurs quantiques

David Wilkowski⁽¹⁾ (david.wilkowski@ntu.edu.sg) et Vincent Mancois⁽²⁾ (vincent.mancois@ntu.edu.sg),

(1) Université Côte d'Azur, IRL Maulab, Nanyang Technological University, 21 Nanyang Link, 637371 Singapore

(2) Centre for Quantum Technologies, Nanyang Technological University, Singapore

Un champ est dit superoscillant lorsque son intensité présente des variations spatiales locales plus rapides que celles données par la composante de Fourier la plus élevée. En utilisant cette propriété surprenante, des atomes ultrafroids ont été piégés dans des pinces optiques dont la taille et l'espacement sont plus petits que ceux imposés par la limite de diffraction du système optique. De telles structures optiques ouvrent la voie vers de nouveaux types de simulateurs quantiques où chaque atome et chaque piège de lumière pourront être contrôlés individuellement.

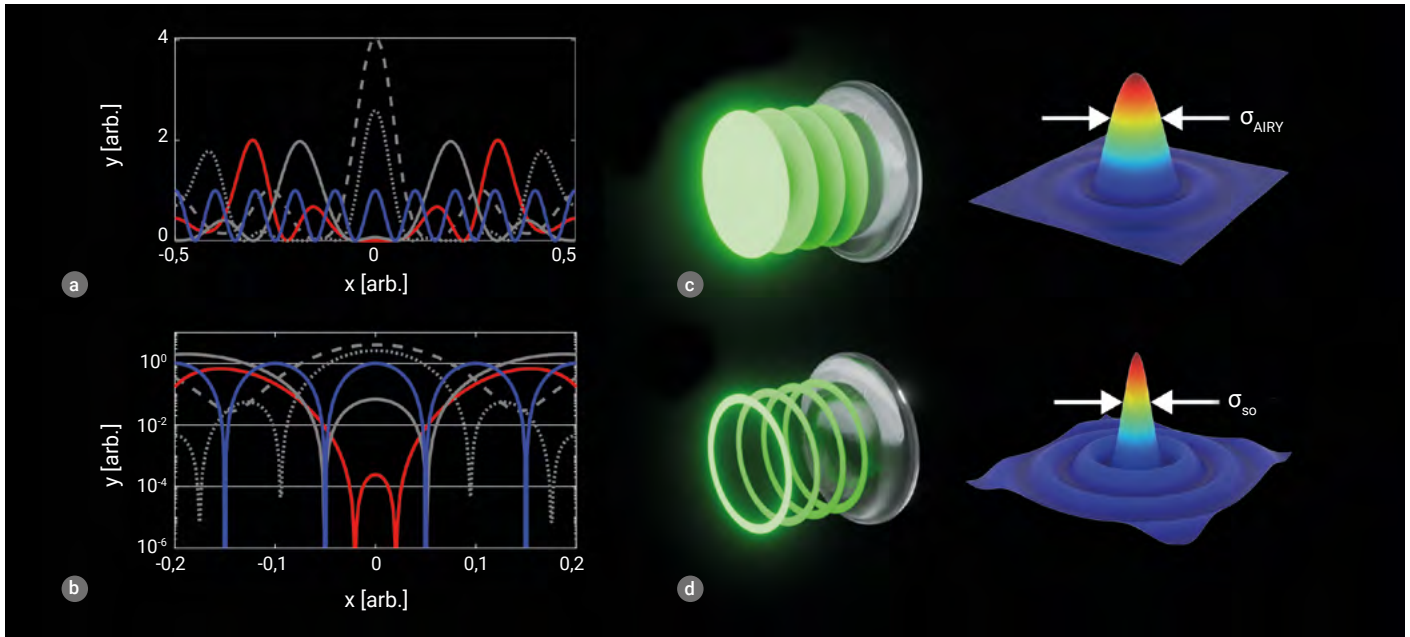
Le premier condensat de Bose-Einstein, dû notamment aux travaux de E. Cornell, W. Ketterle, et C. Wieman (prix Nobel de Physique 2001) a été observé en 1995, donnant une preuve expérimentale directe et indiscutable à une prédiction alors vieille de 70 ans. Ce tour de force n'aurait pu avoir lieu sans le développement, quelques années auparavant, des techniques de refroidissement par laser (S. Chu, W. Phillips et C. Cohen-Tannoudji récompensés par le prix Nobel de Physique 1997). Depuis lors, ce qu'on appelle plus généralement le domaine des gaz ultrafroids a révolutionné la physique atomique, lui ouvrant de nouveaux horizons vers la métrologie de haute précision, l'étude de systèmes fortement corrélés et les ordinateurs quantiques. Ces applications requièrent non seulement le refroidissement mais aussi le piégeage des atomes. Pour cela, des pièges optiques ont été développés à l'aide de faisceaux lasers très désaccordés en fréquence par rapport aux résonances atomiques. Ici les points d'équilibre mécanique stable correspondent

aux maximums d'intensité. En utilisant par exemple une onde optique stationnaire, l'arrangement périodique des pièges permet aux atomes d'y simuler la dynamique des électrons dans une structure cristalline, ouvrant la voie aux simulateurs quantiques avec des gaz ultrafroids. On peut aussi piéger les atomes un par un, dans des pinces optiques faites de faisceaux laser fortement focalisés. L'avantage des pinces optiques réside dans leur arrangement pouvant être contrôlé à volonté et non plus limité aux structures périodiques des réseaux optiques. Le groupe d'Antoine Browaeys à l'Institut d'optique a par exemple assemblé une Tour Eiffel miniature avec des atomes de Rubidium.

Parallèlement à la physique atomique, une autre discipline de la physique, plus ancienne encore, s'est considérablement transformée au cours des trente dernières années. Il s'agit de l'optique qui a bénéficié d'avancées technologiques majeures grâce au contrôle de la cohérence temporelle et spatiale des sources lumineuses. On peut

penser par exemple aux progrès réalisés dans les sources laser en termes de couverture et de finesse spectrales et d'asservissement en fréquence, mais également à l'introduction de nouveaux matériaux optiques aujourd'hui largement répandus. La lumière structurée, qui fait appel à la manipulation en phase et en amplitude d'un faisceau laser par des modulateurs spatiaux de lumière (SLM pour *spatial light modulators*), est en plein essor. Les avancées touchent des domaines très variés comme l'imagerie biomédicale (propagation dans des milieux complexes et turbides), la microscopie subdiffRACTIVE et la génération de faisceaux lumineux ayant des propriétés topologiques non triviales comme la lumière twistée, ou les skyrmions optiques qui sont des structures topologiques imprimées sur la polarisation de la lumière.

Pour le moment, l'utilisation de lumière structurée pour manipuler des atomes ultrafroids n'en est qu'à ses balbutiements. Néanmoins, certaines applications existent déjà, notamment pour contrôler le profil des



1. (a) Tracés sur une période de l'intensité $y(x) = f(x)^2$ pour différents tirages des coefficients a_n : solutions usuelles (en gris), solution superoscillante (en rouge) et harmonique la plus élevée (en bleu).
 (b) Zoom près de l'origine en échelle logarithmique du tracé de la figure 1a. Les solutions usuelles (en gris) montrent une variation proche de la composante de Fourier la plus élevée (en bleu) ou plus lente qu'elle. La solution superoscillante (en rouge) varie plus rapidement car elle atteint des minima locaux sur des distances plus petites que la composante de Fourier la plus élevée.
 (c) Si une onde plane incidente (en vert) est focalisée par une lentille mince (sans aberration), on observe un disque d'Airy au foyer de la lentille.
 (d) Si seulement un anneau extérieur incident (en vert) est éclairé, le lobe central au foyer de la lentille est plus petit que le disque d'Airy $\sigma_{\text{so}} < \sigma_{\text{AIRY}}$. C'est un effet superoscillant en optique.

faisceaux laser utilisés par les ordinateurs quantiques à atomes neutres. Dans cet article, nous détaillons une autre application récente de la lumière structurée consistant à générer et à contrôler des pinces optiques au niveau de la longueur d'onde optique à l'aide d'un effet appelé superoscillation. Nous espérons que dans un futur proche, ces avancées permettront le développement de nouveaux simulateurs quantiques plus polyvalents et plus performants que ceux qui existent aujourd'hui.

Les champs superoscillants

Si l'on observe l'évolution spatiale ou temporelle d'un signal, il est généralement admis que les oscillations les plus rapides sont imposées par la composante de Fourier ayant la fréquence la plus élevée. Considérons par exemple un signal simple composé de cinq harmoniques $f(x) = \sum_{n=1:5} a_n \cos(2\pi nx)$, tel que $\sum_{n=1:5} a_n^2 = 1$. Sur la figure 1a, nous présentons l'intensité du champ, c'est-à-dire l'ampli-

tude au carré pour trois tirages aléatoires des coefficients a_n (tracés en gris). Nous observons que les variations autour de l'origine des tirages sont en effet plus lentes que la composante de Fourier de plus haute fréquence qui correspond à l'harmonique $n = 5$, ici tracée en bleu. Néanmoins il existe aussi des solutions plus rares, dite « superoscillantes », variant localement plus rapidement. Une de ces solutions est tracée en rouge. Le caractère superoscillant de la solution en rouge autour de l'origine est révélé en traçant le signal en échelle logarithmique, comme sur la figure 1b. On voit que la solution superoscillante atteint des minima locaux plus rapidement que l'harmonique $n = 5$.

Les champs électromagnétiques peuvent-ils également présenter des variations spatiales rapides et sont-ils utilisables ? La réponse est oui, comme le montre l'exemple simple suivant que nous allons utiliser tout au long de cet article. Considérons un instrument d'optique équivalent à une lentille idéale, c'est-à-dire qui focalise un champ

lumineux sans aberrations. Si l'instrument d'optique est éclairé de manière homogène, nous obtenons, en appliquant la théorie de la diffraction de Fraunhofer, un disque d'Airy dont la taille du lobe central est $\sigma_{\text{AIRY}} \approx \lambda/2 NA$ où λ est la longueur d'onde de la lumière et $NA = n \sin\theta$ est l'ouverture numérique de la pupille d'entrée de l'instrument d'optique (voir figure 1c), définie comme le produit de l'indice de réfraction n du milieu ambiant (l'air dans notre cas) par le sinus du demi-angle d'acceptance. La taille d'Airy correspond *grosso modo* à la composante transverse de Fourier la plus élevée pouvant être transmise par l'instrument d'optique. Notons que, dans cet exemple, le spectre de Fourier est continu et non plus discret comme dans l'exemple précédent correspondant aux figures 1a et 1b. En plaçant maintenant un filtre de phase et/ou d'amplitude afin de structurer la lumière juste avant l'instrument optique, des chercheurs ont montré que le lobe central de diffraction peut devenir superoscillant c'est-à-dire réduit en taille par rapport au

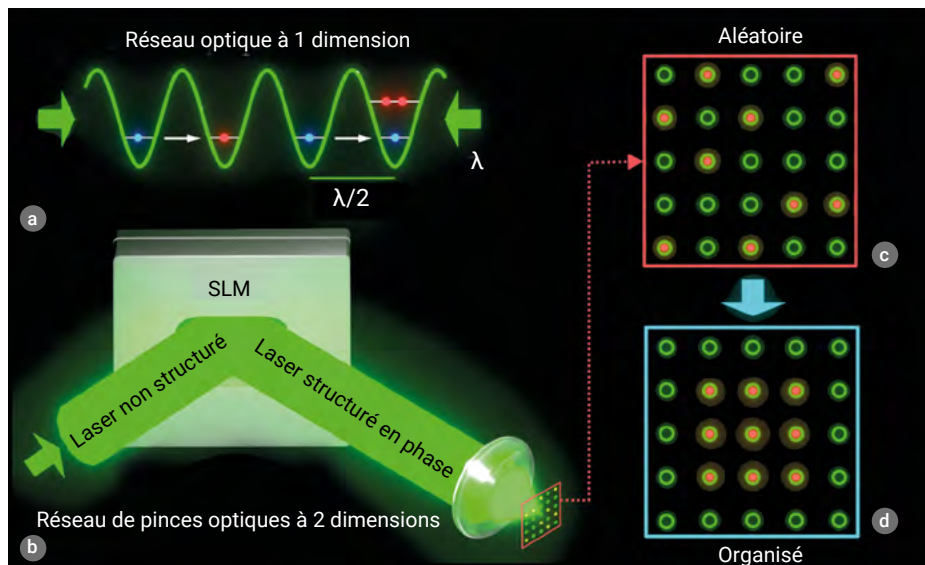
>>>

>>>

disque d'Airy. Ce point est illustré sur la figure 1d, où nous avons simplement considéré un disque opaque couvrant la partie centrale de la pupille d'entrée. L'ouverture de l'instrument d'optique correspond donc à un mince anneau externe donnant un lobe superoscillant plus petit que le disque d'Airy. Une réduction encore plus importante de la taille du lobe central peut être obtenue à l'aide d'un masque plus sophistiqué.

Notons que la limite de diffraction n'est pas violée par la présence de lobes superoscillants, mais modifiée par rapport au cas standard d'un éclairage homogène. Précisons aussi que ce lobe superoscillant est localisé dans le champ lointain. Il ne résulte donc pas d'un effet de champ proche, connu également pour produire des résolutions spatiales en dessous de la limite de diffraction (microscopie SNOM, *scanning near-field optical microscopy* en anglais, par exemple).

Intéressons-nous maintenant à la distribution en intensité de la lumière diffractée. En comparant les profils des figures 1c et 1d, nous voyons que le lobe central de la figure de diffraction du champ superoscillant est en effet plus petit que celui du disque d'Airy mais qu'il possède aussi des anneaux de diffraction satellites plus intenses. En effet, tout rétrécissement du lobe central superoscillant se fait au profit des anneaux satellites, une propriété qui peut sérieusement limiter les domaines d'application des champs superoscillants. Néanmoins, des techniques d'imagerie par transmission super-résolues, c'est-à-dire avec des résolutions spatiales en dessous de la limite de diffraction ont été mises en place à l'aide de lobes lumineux superoscillants. Par une structuration judicieuse de la lumière, les anneaux satellites, pouvant limiter la résolution spatiale de l'appareil optique, ont été éloignés du lobe central afin d'être filtrés après transmission *via* une image intermédiaire. En plus de l'imagerie super-résolue, les lobes superoscillants ont récemment été utilisés comme pinces optiques, soit pour des billes diélectriques ou bien pour des atomes ultrafroids. Comme l'intensité maximale est souvent le facteur limitant, l'intérêt des pinces superoscillantes réside dans un meilleur confinement spatial des objets piégés. Nous discuterons par la suite le confinement d'atomes ultrafroids



2. (a) Un réseau de lumière est réalisé en utilisant deux faisceaux lasers contra-propageant de même longueur d'onde λ . Le pas du réseau d'intensité est $\lambda/2$. Les atomes qui sont dans un état d'énergie donné peuvent se déplacer d'un piège de lumière à l'autre par effet tunnel (illustré par atome bleu devenant rouge). Si un atome rencontre un autre atome, les deux vont interagir, ce qui déplace les niveaux d'énergie dans le piège et modifie ainsi les propriétés de transport des atomes dans le réseau. (b) Une autre méthode pour obtenir un réseau de pièges périodique consiste en un réseau de pinces optiques obtenu en structurant en phase un faisceau laser (*via* un SLM) qui est ensuite focalisé sur les atomes par une lentille. La lentille effectuée une transformée de Fourier du champ émis par le SLM. (c) Les pinces optiques (cercles verts) sont peuplées par des atomes ultrafroids (points rouges) de manière aléatoire. (d) Les atomes peuvent être réarrangés pour former, par exemple, des réseaux sans défauts.

dans plusieurs pinces optiques superoscillantes et leurs applications en simulation quantique.

Les simulateurs quantiques à atomes ultrafroids

Nous voulons comprendre comment les lobes superoscillants peuvent aider à réaliser des simulateurs quantiques à atomes ultrafroids. Pour bien appréhender leur intérêt, commençons par présenter les techniques actuellement utilisées, leurs avantages et leurs limitations.

Au début des années 2000, les physiciens ont commencé à utiliser les atomes ultrafroids comme simulateurs quantiques, essentiellement pour analyser des transports de charge et de *spin* en matière condensée. Le schéma typique consiste à refroidir un gaz d'atomes, d'abord par des techniques de refroidissement par laser et ensuite par évaporation pour atteindre des températures extrêmement basses, de l'ordre de quelques dizaines de nanokelvins. Ainsi, le gaz atteint un régime de dégéné-

rescence quantique, où ses propriétés physiques et statistiques sont principalement déterminées par le caractère symétrique (bosons) ou antisymétrique (fermions) des fonctions d'onde lorsqu'on intervertit les états de deux particules. Le gaz est ensuite transféré dans un réseau optique construit à l'aide d'ondes laser stationnaires. Le pas du réseau étant petit (la longueur d'onde divisée par deux), les atomes peuvent se déplacer d'un piège à l'autre par effet tunnel, c'est-à-dire en traversant la barrière de potentiel entre deux pièges en un temps suffisamment court pour pouvoir être observés dans les expériences. Les atomes interagissent fortement lorsque deux ou plusieurs atomes coexistent dans un même piège (voir figure 2a). Ce type d'expériences a permis des avancées remarquables, notamment dans la compréhension des transitions de phase quantiques et topologiques. Néanmoins, le chargement aléatoire des atomes dans le réseau optique ainsi que des processus résiduels de chauffage limitent le champ d'application des simulateurs quantiques à atomes sur réseau à

ondes stationnaires. Par exemple, la simulation de problèmes impliquant des interactions sans contact (interaction *via* le moment magnétique des particules, par exemple), ou bien la simulation de problèmes liés à la physique des hautes énergies (théories de jauge sur réseau), ou encore la création contrôlée d'états quantiques impliquant plusieurs particules sont difficiles, voire impossibles à réaliser.

Vers 2015, poussé notamment par la recherche sur les ordinateurs quantiques, un nouveau type de réseau à atomes ultrafroids construit à partir de pinces optiques s'est rapidement développé. Ici, un faisceau laser intense est réfléchi par un SLM (voir figure 2b). Ce dernier génère un hologramme qui transforme, au foyer d'une lentille, le faisceau en une multitude de faisceaux laser secondaires et focalisés, formant un réseau de pinces optiques (représenté par des cercles vides sur la figure 2c). Chaque pince peut piéger un atome (point rouge) ou rester inoccupée. De plus, chaque atome peut être refroidi jusqu'à l'énergie du point zéro (énergie minimale autorisée par la mécanique quantique) de la pince optique. Enfin, les atomes peuvent être déplacés, permettant une réorganisation arbitraire de leur agencement afin par exemple de créer un réseau sans défaut (voir figure 2d). Ce nouveau dispositif expérimental lève les limitations des réseaux optiques des premières expériences. Malheureusement, pour éviter les effets d'interférences, les pinces optiques sont généralement séparées d'une distance bien supérieure à leur taille. Cette dernière parvient déjà difficilement à atteindre une taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière, à cause de l'ouverture numérique finie du système optique. Ainsi, les atomes dans les réseaux de pinces optiques sont incapables de dif-

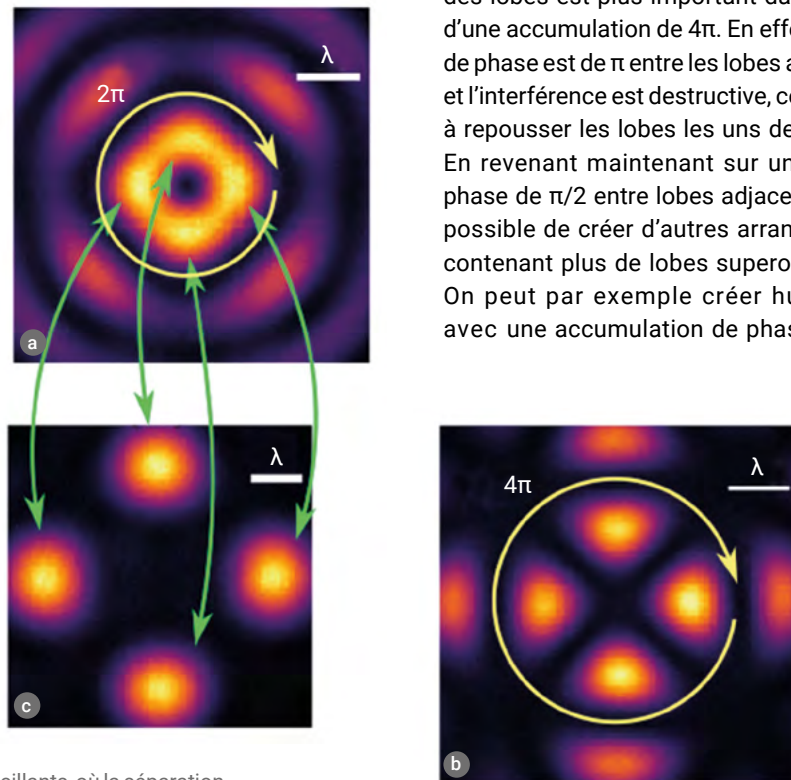
fuser de piège en piège, c'est-à-dire que l'effet tunnel entre pinces optiques est négligeable, limitant leur intérêt comme simulateurs quantiques aux problèmes sans transport.

Atomes piégés dans des lobes superoscillants

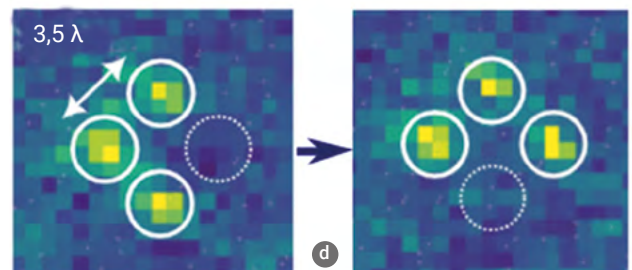
Ainsi s'est posée naturellement la question de savoir s'il était possible de générer plusieurs lobes superoscillants qui soient suffisamment proches afin de permettre le passage par effet tunnel d'un atome d'un lobe vers un des lobes voisins. Notre équipe de recherche a répondu par l'affirmative à cette question, en montrant que quatre lobes superoscillants peuvent être séparés par des distances inférieures à la limite de diffraction standard, c'est-à-dire donnée par

un éclairage homogène du système optique. Comme les lobes sont très proches, les effets d'interférence jouent un rôle prépondérant, et doivent être maîtrisés. En pratique, cela est possible en choisissant convenablement le masque de phase et d'amplitude imprimé à l'entrée du système optique. L'influence des interférences, ou plus précisément de la phase relative entre les lobes, est illustré sur les figures 3a et 3b. Sur la figure 3a, nous avons choisi un saut de phase de $\pi/2$ entre lobes adjacents. Ainsi, si nous effectuons le tour des quatre lobes, la phase s'accumule jusqu'à 2π ce qui explique la structure en anneaux sous-jacente. Pour des raisons de symétrie, l'accumulation de phase est nécessairement un multiple de 2π . Un autre cas, correspondant à une accumulation de 4π est indiqué sur la figure 3b. En comparant les deux figures, on s'aperçoit que l'écartement des lobes est plus important dans le cas d'une accumulation de 4π . En effet, le saut de phase est de π entre les lobes adjacents et l'interférence est destructive, ce qui tend à repousser les lobes les uns des autres. En revenant maintenant sur un saut de phase de $\pi/2$ entre lobes adjacents, il est possible de créer d'autres arrangements contenant plus de lobes superoscillants. On peut par exemple créer huit lobes avec une accumulation de phase de 4π .

>>>



3. (a) Lumière structurée donnant quatre lobes superoscillants, où la séparation des lobes dépend de la phase accumulée sur une boucle qui est ici de 2π . (b) Dans cet autre exemple, la phase accumulée est de 4π , donnant des lobes plus espacés et donc moins favorables pour le transport des atomes par effet tunnel. (c) Pinces optiques standard utilisées pour le chargement des atomes. Les pinces non superoscillantes et superoscillantes sont reliées de manière univoque comme schématisé par les flèches vertes ; on peut donc transférer les atomes des pinces optiques vers les lobes superoscillants et *vice versa*. (d) Imagerie de fluorescence indiquant la présence d'un atome dans une pince. L'image de gauche correspond à la configuration initiale et celle de droite à la configuration finale où les atomes sont passés par les lobes superoscillants. On voit un réarrangement des atomes indiquant qu'un ou plusieurs atomes ont sauté d'un lobe à un de ses voisins.



« Contrairement aux réseaux optiques obtenus avec des ondes stationnaires [...], les réseaux de pinces optiques superoscillantes permettent un chargement et un arrangement déterministes des atomes. »

>>>

Continuant ainsi, douze lobes vont correspondre à une accumulation de phase de 6π et ainsi de suite. Notons que l'on conserve ici une symétrie de rotation, propre aux lobes superoscillants. Pour le moment, la génération de réseaux superoscillants avec d'autres symétries (de translation par exemple) reste un problème ouvert.

Si la création de lobes superoscillants proches les uns des autres est possible, le chargement déterministe des atomes dans ces structures ne semble *a priori* pas facile en raison de leur faible taille qui ne permet pas une résolution spatiale de la lumière de fluorescence émise par les atomes (voir figures 3a et 3b). Pour résoudre ce problème, on peut préalablement charger les atomes dans des pinces optiques non superoscillantes bien séparées, comme cela est indiqué pour quatre pinces sur la figure 3c. La présence d'atomes dans les pinces optiques est détectée par imagerie de fluorescence. À titre d'exemple, l'image de la figure 3d de gauche indique clairement que trois pinces optiques sont occupées chacune par un atome, la quatrième, à droite, étant vide. Le masque de phase est ensuite déformé continûment pour obtenir l'une ou l'autre des structures sur les figures 3a et 3b. Ici, les pinces non superoscillantes et superoscillantes sont reliées de manière univoque comme cela est schématisé par les flèches vertes. Après un certain temps, on revient aux pinces optiques non superoscillantes bien séparées et on effectue une seconde mesure du nombre et de la distribution des atomes dans les pinces optiques. Par exemple, l'image de fluorescence de la figure 3d de droite indique que les atomes se sont déplacés notamment parce que la pince optique de droite est maintenant peuplée par un atome. L'expérience décrite dans la figure 3 a été effectuée dans un

régime où la température du gaz (environ 30 microkelvins) est trop élevée pour que les effets quantiques puissent dominer les fluctuations thermiques classiques. La prochaine étape consisterait à réduire la température du gaz, avant la phase superoscillante, afin que les atomes soient principalement dans l'état fondamental des pièges.

En conclusion, nous avons présenté dans cet article une nouvelle approche pour manipuler des atomes ultrafroids à l'aide de réseaux de pinces optiques superoscillantes. Ces dernières peuvent être suffisamment proches pour permettre le passage des atomes d'une pince à l'autre par effet tunnel. Ainsi les pinces optiques superoscillantes permettraient de développer de nouveaux simulateurs quantiques à atomes ultrafroids pour des problèmes en matière condensée (supraconduction à haute température critique, transition de

phase quantique ...) ou en physique des hautes énergies (théorie des champs de jauge sur réseau). Contrairement aux réseaux optiques obtenus avec des ondes stationnaires, qui sont actuellement les systèmes couramment utilisés, les réseaux de pinces optiques superoscillantes permettent un chargement et un arrangement déterministes des atomes. De plus, le réseau, contrôlé par un SLM, peut être dilaté avant et après la phase superoscillante pour permettre une lecture précise de la population atomique des pinces optiques. Ainsi, l'expérience décrite dans la figure 3, nous indique la marche à suivre. Elle consiste à mesurer le réarrangement des atomes après un temps d'interaction dans les pinces superoscillantes. On peut ainsi accéder aux corrélations spatiales des atomes qui fournissent des informations essentielles pour comprendre l'évolution quantique du système. Cette dernière peut être certainement prédite pour des simulateurs à quatre atomes, mais devient beaucoup plus difficile, voire extrêmement complexe si plusieurs dizaines d'atomes interagissent dans les pinces optiques. En plus des applications en simulation quantique, les pinces optiques superoscillantes permettent la création d'états quantiques séparables qui évolueraient ensuite, via des interactions entre atomes bien contrôlées, vers des états quantiques plus complexes par exemple d'intérêt métrologique ou pour l'information quantique. ■



- Principes du refroidissement d'atomes par laser : https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_cooling ; Jean Dalibard, cours 'Atomes froids'
- Les condensats de Bose-Einstein : "Bose-Einstein condensate" - Wikipedia ; M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269** (1995) 198.
- Géométries diverses de pinces optiques : D. Barredo, V. Lienhard, S. de Léséleuc, T. Lahaye, and A. Browaeys, *Nature* **561** (2018) 79.
- Simulations quantiques avec des atomes ultrafroids : I. Bloch, J. Dalibard, and S. Nascimbène, *Nature Physics* **8** (2012) 267.
- Ordinateurs quantiques à atomes neutres : D. Barredo, S. de Léséleuc, V. Lienhard, T. Lahaye, and A. Browaeys, *Science* **354** (2016) 1021 ; "Neutral atom quantum computer" - Wikipedia
- Principes fondamentaux des superoscillations : M. V. Berry and S. Popescu, *J. Phys. A Math. Gen.* **39** (2006) 6965.
- Application des champs optiques superoscillants : N. I. Zheludev and G.-H. Yuan, *Nature Reviews Physics* **4** (2022) 16.
- Atomes dans des pinces optiques superoscillantes : H. M. Rivy S. A. Aljunid, E. Lassalle, N. I. Zheludev, and D. Wilkowski, *Comm. Phys.* **6** (2023) 155 ; K. Lim, V. Mancois, H. Wu, Y. Shen, and D. Wilkowski, *Phys. Rev. A* **112** (2025) L051307.