



COMMUNIQUÉ DE PRESSE

Attention, résultat sous embargo jusqu'au 30 septembre 17 heure de Paris (16 h heure de Londres)

Grenoble, le 30 septembre 2019

Une nouvelle méthode de microscopie en champ proche prometteuse pour étudier les propriétés topologiques des électrons dans les matériaux.

Dans le graphène, le comportement ultra-relativiste des électrons est associé à une propriété topologique de leurs fonctions d'onde. Une équipe internationale dont des physiciens de l'Université Grenoble Alpes, de l'Université de Bordeaux, du CEA et du CNRS, proposent une nouvelle approche de microscopie à effet tunnel pour mesurer cette propriété topologique dans la densité électronique au voisinage d'un atome d'hydrogène greffé sur la surface. Publiée ce 30 septembre 2019 dans la revue *Nature*, cette avancée conceptuelle ouvre une nouvelle voie pour étudier les propriétés topologiques des états électroniques par microscopie à effet tunnel, et comprendre ainsi comment elles affectent les propriétés électriques et optiques des matériaux.

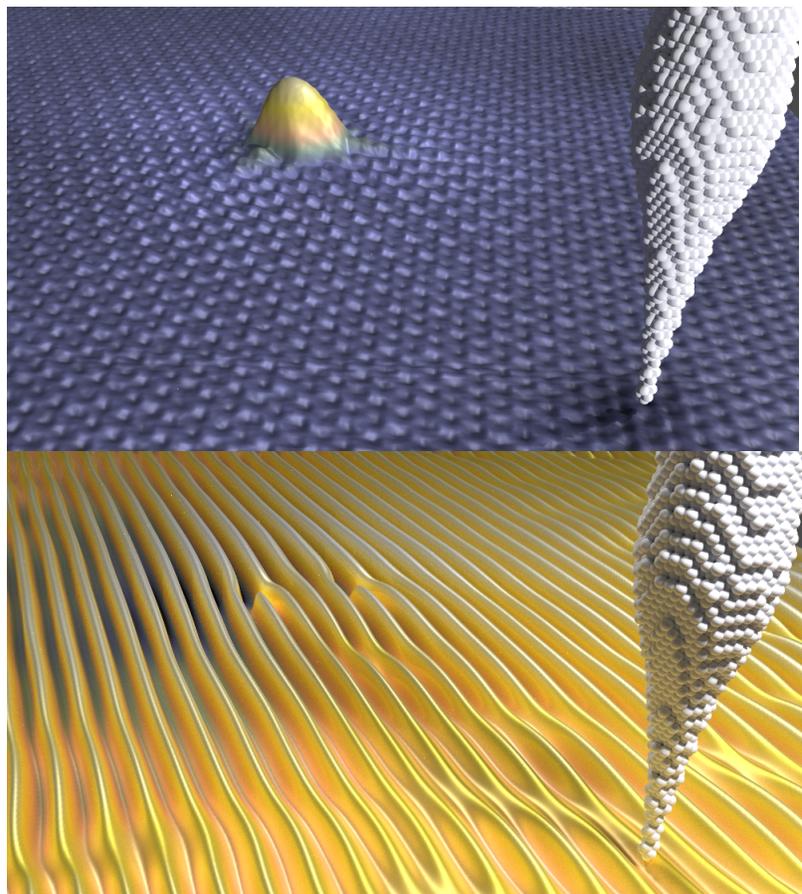
La représentation du temps à la surface du globe par les fuseaux horaires pose le problème suivant : quelle heure est-il au pôle Nord où tous les fuseaux se rejoignent ? Y serait-il toutes les heures en même temps ? Le pôle Nord est ici un point où l'heure apparaît mal définie dans cette représentation, un point singulier. Une manière de révéler ce point singulier consiste à imaginer, comme le fait Jules Verne dans son roman *Le tour du monde en quatre-vingts jours*, un voyageur qui ferait le tour de la Terre, par exemple vers l'Est. Lors de son périple, ce voyageur parcourt ainsi les 24 fuseaux horaires. S'il avance sa montre d'une heure à chaque fuseau qu'il traverse, il observera à son retour une différence d'un jour par rapport à une horloge restée sur place. Cette différence, qui est la clé du retournement final du livre de Jules Vernes, est d'autant plus remarquable qu'elle est insensible aux détails du chemin emprunté par le voyageur, comme la latitude. Elle dépend seulement du nombre de tours effectués autour du pôle Nord. Une telle propriété est dite "topologique".

En physique quantique, les propriétés topologiques jouent un rôle prépondérant dans la caractérisation de nouveaux états électroniques. Par exemple, les électrons de faible énergie dans une feuille d'atomes de carbone, le graphène, s'apparentent à des particules évoluant à vitesse proche de celle de la lumière.

Ce comportement ultra-relativiste est aussi caractérisé par une propriété topologique, associée à une sorte de pôle Nord dans un espace abstrait. Or, les électrons possèdent une horloge interne : la phase de leurs fonctions d'onde. Comme le voyageur de Jules Vernes, c'est donc en forçant les électrons à tourner autour de ce pôle Nord, à l'aide d'un champ magnétique que les physiciens révélèrent l'existence de ce point singulier. La phase acquise le long de la révolution se traduit par un effet Hall quantique 'anormal' observé dans la résistance électrique du graphène. Ceci constitua une preuve de l'existence de particules ultra-relativistes dans le matériau et contribua à l'attribution du prix Nobel de physique 2010.

Néanmoins, de telles mesures sous champ magnétique requièrent des échantillons très purs et les propriétés topologiques restent en pratique difficiles d'accès. L'équipe internationale présente dans la revue Nature une nouvelle méthode qui permet de mesurer cette propriété topologique dans le graphène sans champ magnétique. Cette méthode est un saut conceptuel, car elle ne nécessite pas de forcer les électrons à voyager autour de leur pôle nord. Les chercheurs ont montré que l'on peut matérialiser directement ce pôle Nord abstrait à la surface du matériau, en y déposant un atome d'hydrogène. En étudiant avec un microscope à effet tunnel comment les électrons se réorganisent autour de l'atome d'hydrogène, ils ont observé des dislocations dans la densité électronique (voir figure). Ils ont ensuite montré que le nombre de fronts d'onde additionnels est une mesure de la propriété topologique des électrons du graphène. Cette avancée conceptuelle ouvre une nouvelle voie pour étudier les propriétés topologiques des états électroniques par microscopie, et comprendre ainsi comment elles affectent les propriétés électriques et optiques des matériaux.

Figure 1 : En haut, une reconstruction 3D de l'image obtenue par microscopie à effet tunnel. On voit à droite de l'image une représentation artistique de la pointe qui sert à la mesure de cette image. Le dôme doré correspond à l'atome d'hydrogène. Les ondulations observées loin de cet atome proviennent du réseau atomique du graphène. D'autres oscillations liées à la réorganisation des électrons se superposent au voisinage de l'atome d'hydrogène. Ce signal est extrait et amplifié dans l'image du bas. On observe deux rangées supplémentaires dans les fronts d'onde : les dislocations. Ces dislocations sont la matérialisation dans l'espace réel de la singularité topologique du graphène.



Référence de la publication dans Nature : doi : [10.1038/s41586-019-1613-5](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1613-5)

À PROPOS

L'Université Grenoble Alpes – UGA

Grande université pluridisciplinaire, l'UGA représente un acteur majeur de l'enseignement supérieur et de la recherche en France. Dans un monde de plus en plus compétitif, l'UGA a pour ambition de mieux répondre à l'ensemble des défis posés aux universités par le monde d'aujourd'hui et de demain, et d'être encore plus visible et attractif à l'international. Grâce à ses **82** laboratoires, en partenariat avec les organismes de recherche et les grandes écoles du site, la recherche à l'UGA gagne en interdisciplinarité pour être à la pointe de l'innovation. Son offre de formation couvre également l'ensemble des champs disciplinaires. L'UGA est aujourd'hui en mesure de proposer à ses **46 000** étudiants des formations transversales et de faciliter les passerelles entre les diplômes.

<https://www.univ-grenoble-alpes.fr>

L'Université de Bordeaux

Avec plus de 56 000 étudiants, 6000 personnels dont près de 3200 enseignants-chercheurs et chercheurs, l'université de Bordeaux est aujourd'hui l'une des plus grandes universités françaises. Implantée sur tout le territoire aquitain et reconnue pour la qualité de ses enseignements et son exigence scientifique, elle est un acteur de premier plan de l'enseignement supérieur et de la recherche au niveau régional et national.

<https://www.u-bordeaux.com/>

Le CEA

Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) est un organisme public de recherche à caractère scientifique, technique et industriel (EPIC).

Acteur majeur de la recherche, du développement et de l'innovation, le CEA intervient dans quatre domaines : la défense et la sécurité, les énergies bas carbone (nucléaire et renouvelables), la recherche technologique pour l'industrie et la recherche fondamentale (sciences de la matière et sciences de la vie). S'appuyant sur une capacité d'expertise reconnue, le CEA participe à la mise en place de projets de collaboration avec de nombreux partenaires académiques et industriels.

<http://www.cea.fr/>

Le CNRS

Le Centre national de la recherche scientifique est le principal organisme public de recherche en France et en Europe. Il produit du savoir pour le mettre au service de la société, innove et crée des entreprises. Avec près de 32 000 personnes, un budget de 3,4 milliards d'euros et une implantation sur l'ensemble du territoire national, le CNRS exerce son activité dans tous les champs de la connaissance, en s'appuyant sur plus de 1100 laboratoires. Avec 22 lauréats du prix Nobel et 12 de la Médaille Fields, le CNRS a une longue tradition d'excellence. Le CNRS mène des recherches dans l'ensemble des domaines scientifiques, technologiques et sociétaux : mathématiques, physique, sciences et technologies de l'information et de la communication, physique nucléaire et des hautes énergies, sciences de la planète et de l'Univers, chimie, sciences du vivant, sciences humaines et sociales, environnement et ingénierie.

www.cnrs.fr

Universidad Autónoma de Madrid

The Universidad Autonoma de Madrid is one of Spain's most prominent higher education institutions. It is a public university with a strong social commitment. Since its foundation in 1968, it pursues cutting-edge research and scientific excellence. It promotes innovation and transfer of knowledge as the driving force of social and economic development.

<http://www.uam.es>

Radboud University

Radboud University is a public university with a strong focus on research, established in 1923 and located in Nijmegen, the oldest city of the Netherlands. It is a broad, internationally oriented research university. We value quality, combining excellent education with leading-edge research. Our academic expertise is closely related to important societal issues, both in the public and in the private domain. We play an important role in transferring knowledge to society. In this respect, regional entrepreneurs in particular benefit from our activities.

<https://www.ru.nl/>

Contact presse

Muriel Jakobiak-Fontana

Directrice adjointe communication de l'Université Grenoble Alpes
muriel.jakobiak@univ-grenoble-alpes.fr
Tél. 06 71 06 92 26

Contact chercheur

Vincent Renard

Maître de conférences Université Grenoble Alpes
Vincent.renard@univ-grenoble-alpes.fr