



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-vingt 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 Verne, 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».

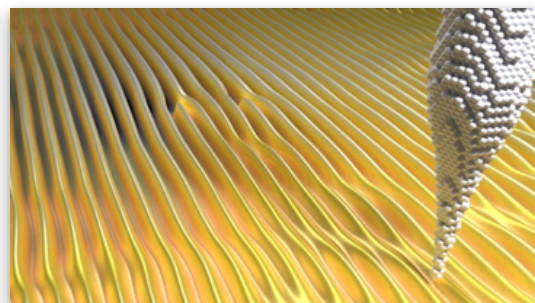
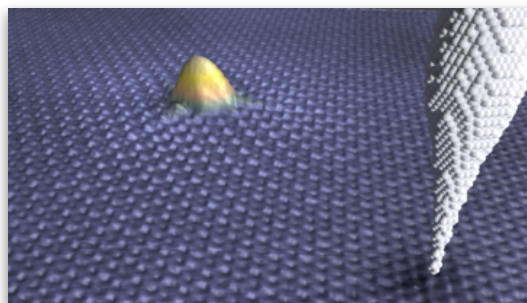
En physique quantique, les propriétés topologiques jouent un rôle prépondérant dans la caractérisation de nouveaux états électroniques. Par exemple, les électrons de faible énergie dans une feuille d'atomes de carbone, le graphène, s'apparentent à des particules évoluant à vitesse proche de celle de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

RÉFÉRENCE

Dutreix C, Gonzalez-Herrero H, Brihuega I, Katsnelson MI, Chapelier C and Renard VT. Measuring graphene's Berry phase from wavefront dislocations in Friedel oscillations. *Nature*, 2019



Gauche : 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. Droite : 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.

Contact : [Vincent Renard](#)
[Phelips](#)
Photonique Électronique et Ingénierie
Quantiques

Intrapix - Un dispositif de caractérisation unique en son genre

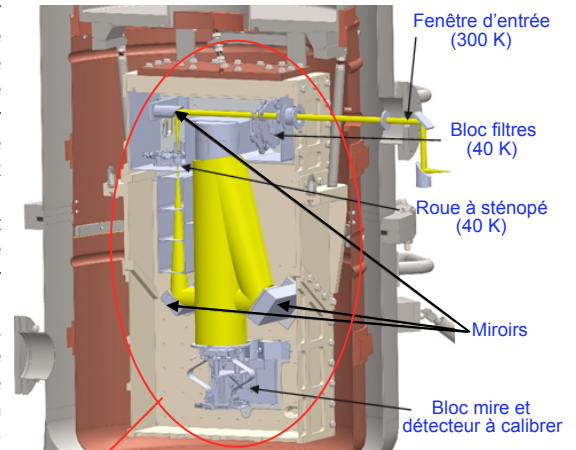
Dans le but d'observer toujours plus loin et avec une résolution toujours meilleure les étoiles et les galaxies, des dispositifs de plus en plus sophistiqués sont imaginés et créés. Ainsi, la résolution des capteurs et leur sensibilité aux plus petits flux de lumière s'améliorent au fil des avancées. Parmi eux, le bolomètre, un détecteur dont le principe général est de convertir l'énergie du rayonnement incident en chaleur pour élever la température d'un corps muni d'un thermomètre. Chaque bolomètre comporte quelques milliers de pixels, chacun représentant un carré d'une dizaine de microns de côté. Or, lorsqu'un photon atteint un pixel, il semblerait qu'il donne un signal différent en fonction du point d'impact, bord ou centre du pixel. D'où le projet Intrapix, un cryostat destiné à caractériser finement ces bolomètres.

Le Département des Systèmes Basses Températures (DSBT) de l'Irigoien s'est imposé au fil du temps comme une référence au sein de la communauté de la cryogénie spatiale. Dans le cadre de la mission Herschel, le plus grand télescope jamais mis sur orbite, le DSBT a conçu les cryo-réfrigérateurs destinés à refroidir à 270 mK les détecteurs d'observation de deux instruments. ArTeMis, une caméra photonique sub-millimétrique exploitée par l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA-Saclay, a bénéficié de l'héritage Herschel. En effet, cette caméra composée de bolomètres fonctionnant à 300 mK et installée au foyer du grand télescope Apex (Chili) est refroidie par une chaîne cryogénique et un cryostat tous deux entièrement conçus au DSBT.

C'est donc naturellement que le DSBT intègre le projet Intrapix, porté par l'Irfu, avec comme double objectif de concevoir un banc d'essais optique destiné à caractériser les bolomètres et de mettre au point un tout nouveau cryostat afin de maintenir ce banc à basse température. Ce cryostat comporte une partie cryogénique composée d'un réservoir d'azote liquide et d'un tube à gaz pulsé destiné au refroidissement du banc et des détecteurs. En phase de conception, des calculs de pré-dimensionnement (sans optique) réalisés par le DSBT ont montré qu'aucune contrainte thermomécanique ne pouvait engendrer de déformations notables pouvant affecter le trajet du faisceau lumineux (Figure). Un traitement thermique cryogénique particulier du banc sera effectué pour lui garantir une stabilité dimensionnelle dans le temps.

L'intégration du banc optique dans le cryostat (Figure),

avec ces différents composants optiques, permettra au projet Intrapix de servir les plus grands projets d'astrophysique européens tels que [Euclid-VIS](#), [JWST-Miri](#), [PLATO](#). Intrapix est unique au monde et permettra la caractérisation intra-pixel de détecteurs matriciels pour le visible ou l'infrarouge dans le domaine de l'astrophysique.



Banc optique

Schéma de fonctionnement d'Intrapix.

Une coupe est réalisée montrant l'intérieur du cryostat conçu et réalisé par le DSBT où se trouve le banc d'essais optique sur lequel sont montés les différents composants (miroirs, roue à filtre, collimateurs, mire à motifs, etc.) conçus par le Département d'Astrophysique de l'Irfu et réalisée par l'Université Durham. En jaune : parcours du faisceau lumineux. © CEA

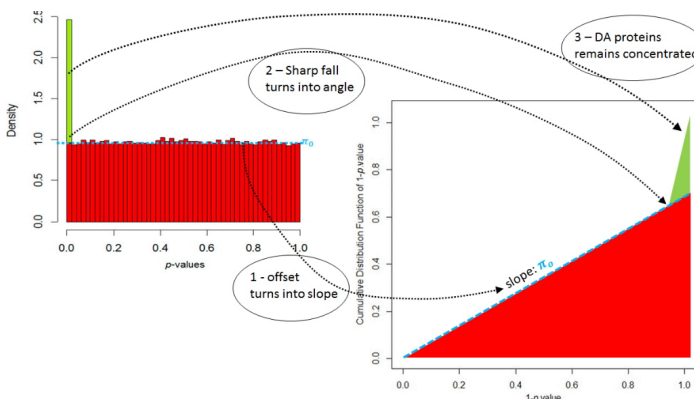
Contact : [Éric Ercolani](#)
DSBT
Département des Systèmes Basses
Températures

Unintentional p-value hacking, ou le risque de faire mentir les données, malgré elles

« Il y a trois types de mensonges : les mensonges, les sacrés mensonges et les statistiques ». Cette phrase de Benjamin Disraeli trouve son origine dans un usage inadapté des outils statistiques, dans le but de cautionner une intuition ou une conviction. Bien que décriée, cette pratique a malheureusement son pendant en recherche : le *p-value hacking*, qui consiste à triturer les données jusqu'à obtenir la significativité désirée pour une hypothèse testée, au détriment de certaines règles statistiques qui s'en trouvent violées. Le plus souvent, cela est fait en toute bonne foi puisque l'objectif est de tirer le meilleur parti possible des données tout en se conformant aux exigences de publication. Malgré tout, il est indispensable de limiter cette pratique qui engendre de nombreuses fausses découvertes.

Cela est d'autant plus vraie en protéomique, en raison de la complexité intrinsèque du protéome, mais aussi de l'évolution rapide des technologies analytiques. C'est notamment pour cela que de nombreux outils bioinformatiques et biostatistiques fleurissent régulièrement dans la littérature [1], avec la promesse de pouvoir dépasser la triple limite des *big proteomics data* : leur grande taille, leur grande dimensionnalité, et leur grande complexité. Cependant, la simplicité qu'offrent ses outils ne saurait masquer la nécessité d'un minimum de compréhension théorique pour une utilisation et des résultats corrects.

C'est avec cet objectif que des chercheurs du laboratoire Biologie à Grande Échelle de l'Irigoien ont réalisé ces dernières années un effort particulier dans la divulgation de bonnes pratiques en science des données pour la protéomique [2-4]. Ils ont ainsi publié une introduction à la théorie du FDR (*False Discovery Rate*, une mesure de contrôle qualité omniprésente), ils ont désambiguïté un ensemble de termes ayant des significations différentes en intelligence artificielle et en chimie analytique, et ont également proposé cinq étapes de contrôle permettant d'améliorer la qualité d'une analyse protéomique différentielle entre plusieurs échantillons.



Construction graphique permettant d'estimer visuellement la qualité de la calibration des p-values.

RÉFÉRENCES

- [1] Jacob L, Combes F and Burger T. PEPA test: Fast and powerful differential analysis from relative quantitative proteomics data using shared peptides. *Biostatistics*, 2018
- [2] Burger T. Gentle introduction to the statistical foundations of false discovery rate in quantitative proteomics. *Journal of Proteome Research*, 2018
- [3] Borges H, Guibert R, Oermiakova O and Burger T. Distinguishing between spectral clustering and cluster analysis of mass spectra. *Journal of Proteome Research*, 2019
- [4] Wiczorek S, Gial Gianetto Q and Burger T. Five simple yet essential steps to correctly estimate the rate of false differentially abundant proteins in mass spectrometry analyses. *Journal of Proteomics*, 2019

Contact : [Thomas Burger](#)
BGE
Biologie à Grande Échelle



Modéliser les qubits de trous pour mieux percer leurs secrets

Les qubits sont des dispositifs dans lesquels une information est stockée comme une superposition quantique de deux états « 0 » et « 1 ». La possibilité de pouvoir superposer différentes configurations ouvre en effet de nombreuses perspectives pour le traitement de l'information. Ces états « 0 » et « 1 » peuvent être les états de spin « up » et « down » d'un électron placé dans un champ magnétique. Le CEA-Grenoble fabrique de tels qubits de spin en piégeant des électrons sous les grilles de transistors silicium-sur-isolant (SOI). Il est également possible de stocker une information dans le spin d'un « trou » laissé après avoir arraché un électron au silicium. La physique de ces trous est très originale, riche et complexe. La simulation numérique permet de mieux appréhender leur comportement et de montrer leur potentiel.

Dans les qubits silicium, le spin est manipulé en modulant le champ magnétique dans lequel est plongé le dispositif. Il reste toutefois difficile de contrôler de telles modulations à l'échelle du qubit unique. C'est pourquoi il peut être avantageux de réaliser des qubits en utilisant des « trous » plutôt que des électrons. Ceux-ci sont en effet soumis à un fort « couplage spin-orbite », c'est à dire que le spin d'un trou est intimement lié à son mouvement dans l'espace. Il devient ainsi possible d'agir sur le spin d'un trou en lui imprimant un mouvement oscillatoire grâce à un champ électrique radio-fréquence directement créé par la grille du transistor (et beaucoup plus facile à contrôler qu'un champ magnétique radio-fréquence).

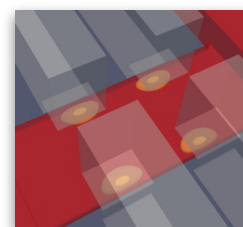
La physique des trous est cependant beaucoup plus riche et complexe que celle des électrons. Des chercheurs de l'Irigoien ont récemment analysé des expériences menées sur les qubits de trous [1, 2] en s'appuyant sur des simulations numériques qui décrivent en détail ces dispositifs quantiques jusqu'à l'échelle atomique si besoin. Ces simulations leur ont permis d'accéder à de nombreuses quantités qui ne sont pas mesurables expérimentalement et complètent donc le « portrait » qu'ils ont pu établir de ces qubits. Ces simulations ont en particulier permis aux chercheurs de mieux comprendre les mécanismes de manipulation du spin à l'échelle nanométrique [3]. Ils ont alors été en mesure d'établir un modèle analytique « minimal » qui reprend les mécanismes essentiels mis en évidence par la simulation [4]. Ce modèle analytique décrit les conditions à réunir pour optimiser le contrôle des trous et démontre que le silicium constitue un matériau idéal pour les qubits de trous malgré son faible couplage spin-orbite, en raison de

ses propriétés électroniques très anisotropes (la dynamique des trous dépendant très fort de la direction de leur mouvement dans le cristal).

Ces travaux ouvrent la voie à l'optimisation des dispositifs de trous et à une compréhension fine des effets du couplage spin-orbite dans le silicium.

RÉFÉRENCES

- [1] Maurand R, Jehl X, Kotekar-Patil D, Corna A, Bohuslavskiy H, Laviéville R, Hutin L, Barraud B, Vinet M, Sanquer M and De Franceschi S. A CMOS silicon spin qubit. *Nature communications*, 2016.
- [2] Crippa A, Maurand R, Bourdet L, Kotekar-Patil D, Amisse A, Jehl X, Sanquer M, Laviéville R, Bohuslavskiy H, Hutin L, Barraud S, Vinet M, Niquet YM and De Franceschi S. Electrical spin driving by *g*-matrix modulation in spin-orbit qubits. *Physical Review Letters*, 2018
- [3] Venitucci B, Bourdet L, Pouzada D and Niquet YM. Electrical manipulation of semiconductor spin qubits within the *g*-matrix formalism. *Physical Review B*, 2018
- [4] Venitucci B and Niquet YM. Simple model for electrical hole spin manipulation in semiconductor quantum dots: Impact of dot material and orientation. *Physical Review B*, 2019



Modélisation de quatre qubits le long d'un fil de silicium (rouge), chacun contrôlé par une grille (gris transparent). Sont représentées en jaune les iso-surfaces de densité électronique sous chacune de ces grilles qui indiquent où sont localisés les trous.

Contact : [Yann-Michel Niquet](#)
MEM
Modélisation et Exploration des
Matériaux

Vers un nouveau type de diagnostic de l'Alzheimer ?

Les fibres amyloïdes sont des auto-assemblages de protéines dont la structure fibrillaire a d'abord attiré l'attention car leur accumulation au sein de dépôts amyloïdes dans le cerveau a été mise en évidence dans le cas de maladies neuro-dégénératives (Alzheimer, Parkinson, maladie de la vache folle). Leur détection *in vivo* est un axe de recherche essentiel pour le diagnostic des maladies associées à l'accumulation de dépôts amyloïdes : les amyloses. En effet, dans le cas des maladies d'Alzheimer et de Parkinson, un diagnostic est nécessaire non seulement pour de meilleurs soins médicaux mais aussi pour le développement de nouveaux traitements.

Lors d'une *collaboration*, des chercheurs du laboratoire Chimie et Biologie des Métaux de l'Irigoien ont mis en évidence des propriétés de luminescence des fibres amyloïdes allant du visible au proche infrarouge. Dans le bleu, cette luminescence permet de détecter des dépôts amyloïdes dans une coupe de cerveau humain (Figure, gauche) sans aucun marquage et d'observer leur structure tridimensionnelle.

Dans le proche infrarouge, c'est-à-dire dans la fenêtre de diagnostic, ce signal a permis de détecter des dépôts amyloïdes dans le crane de souris vivantes ayant développé la maladie d'Alzheimer (Figure, droite). Cette observation pourrait ainsi constituer un nouvel outil de dépistage et diagnostic contre Alzheimer et d'autres maladies à dépôts amyloïdes comme le diabète de type 2 et les amyloses systémiques.

Collaborations : Ces travaux sont issus d'une collaboration Université Grenoble-Alpes, Inserm, CNRS, l'INP Grenoble, le Synchrotron Grenoble, l'Université de Cergy-Pontoise et l'école de médecine de Genève (Suisse).

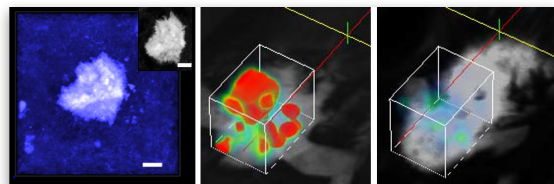


Image de gauche : Image de microscopie confocale d'un dépôt amyloïde *ex vivo* sur une coupe d'un cerveau d'une personne atteinte d'Alzheimer dans la région de l'hippocampe. Modélisation 3D du dépôt amyloïde à partir de 60 sections détectées dans le bleu. (Encadré) Section typique du dépôt amyloïde. Les barres d'échelle correspondent à 5 µm.

Images du centre et de droite : Détection des dépôts d'amyloïde sur animaux vivants par imagerie NIR 3D chez des souris « Alzheimer » (au centre) et chez des souris témoins (à droite).

RÉFÉRENCE

Pansieri J, Josserand V, Lee SJ, Rongier A, Imbert D, Moulin Sallanon M, Kövari E, Dane TG, Vendrely C, Chaix-Pluchery O, Guidetti M, Vollaire J, Fertin A, Usson Y, Rannou P, Coll JL, Marquette C and Forge V. Ultraviolet-visible-near-infrared optical properties of amyloid fibrils shed light on amyloidogenesis. *Nature Photonics*, 2019

Contact : [Vincent Forge](#)
CBM
Laboratoire Chimie et Biologie des
Métaux

Les laboratoires

**Biologie du Cancer
et de l'Infection**
UMR_S 1036
CEA/Inserm/UGA
www.BCI-lab.fr

**Biologie à Grande
Échelle**
UMR_S 1038
CEA/Inserm/UGA
www.BGE-lab.fr

**Chimie et Biologie
des Métaux**
UMR 5249
CEA/CNRS/UGA
www.CBM-lab.fr

**Institut de Biologie
Structurale**
UMR 5075
CEA/CNRS/UGA
www.IBS.fr

**Modélisation et
Exploration des Matériaux**
UMR CEA/UGA
www.MEM-lab.fr

**Photonique Électronique
et Ingénierie Quantiques**
UMR CEA/UGA
www.Pheligs.fr

**Physiologie Cellulaire
& Végétale**
UMR 5168
CEA/CNRS/UGA/Inra
www.LPCV.fr

**Département des Systèmes
Basses Températures**
UMR CEA/UGA
www.d-SBT.fr

**Spintronique et Technologie
des Composants**
UMR 8191
CEA/CNRS/UGA/G-INP
www.Spintec.fr

**Systèmes Moléculaires et
nanoMatériaux pour
l'Énergie et la Santé**
UMR CEA/CNRS/UGA
www.Symmes.fr

irig.cea.fr

Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble
CEA-Grenoble
17 avenue des Martyrs | 38054 Grenoble cedex 9

irig.cea.fr/drf/irig/actu/lettres
Responsables : Jérôme Garin et
Pascale Bayle-Guillemaud

Directeur
de la publication
Jérôme Garin

Éditeur et format électronique
Pascal Martinez
Pascal.Martinez@cea.fr

Comité de rédaction
**Thomas Burger, Éric Ercolani, Vincent
Forge, Yann-Michel Niquet, Vincent
Renard**

© CEA [2019]. Tous droits réservés. Toute reproduction totale ou partielle sur quelque support que ce soit ou utilisation du contenu de ce document est interdite sans l'autorisation écrite préalable du CEA

