



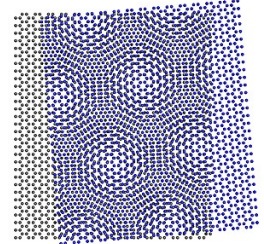
Master Internship Proposal

Title: Strong correlations in graphene moiré structures

Laboratory: Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés, Grenoble

Supervisor: Cécile Repellin

Contact: cecile.repellin@lpmmc.cnrs.fr



Summary

Layers of two-dimensional materials such as graphene can be stacked in a controlled way to create new properties that do not exist in monolayer graphene. More specifically, the controlled misalignment of two layers results in a superlattice potential which modifies the band structure of the device. In bilayer graphene, a slight (or 'magic') rotation angle (1.1 degrees) between the two layers results in perfectly flat conduction and valence bands [1]. The vanishing kinetic energy in these bands gives a central role to Coulomb interactions; at partial filling of these bands, the many-body ground state is characterized by strong correlations. The most striking consequence is the experimental observation of superconductivity as well as correlated insulators in magic angle twisted bilayer graphene in 2018 [2, 3]. In the past two years, a plethora of other strongly correlated phenomena has been observed in twisted bilayer graphene and other moiré structures combining three or four layers of graphene. These observations call for an in-depth theoretical study of strong correlations in graphene moiré structures.

The aim of this internship is to investigate the possibility of quantum phases combining symmetry breaking and topology in flat-band graphene moiré materials. We will focus on moiré materials featuring a nearly flat valence band with a Hall conductivity $C \frac{e^2}{h}$ where $C \neq 0$ is an integer topological invariant called the Chern number [4]. The student will learn how to numerically calculate the many-body Hamiltonian of interacting electrons in this band, and how to obtain its ground state and low-energy spectrum using exact diagonalization [5]. We will then analyze the properties of the spectra obtained for various parameters, as well as observables calculated in the ground state to figure out the nature of the many-body ground state at specific fillings of the valence band.

This internship can be followed by a PhD thesis.

References

1. R. Bistritzer and A. H. MacDonald, Moiré bands in twisted double-layer graphene, Proceedings of the National Academy of Sciences 108, 12233 (2011).
2. Y. Cao, V. Fatemi, A. Demir, S. Fang, S. L. Tomarken, J. Y. Luo, J. D. Sanchez-Yamagishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras, R. C. Ashoori, P. Jarillo-Herrero, Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices, Nature 556, 80 (2018).
3. Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras, P. Jarillo-Herrero, Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices, Nature 556, 43 (2018).
4. Y.H. Zhang, D. Mao, Y. Cao, P. Jarillo-Herrero, T. Senthil, Nearly flat Chern bands in moiré superlattices, Physical Review B 99 (7), 075127 (2019).
5. C. Repellin, Z. Dong, Y.H. Zhang, T. Senthil, Ferromagnetism in narrow bands of moiré superlattices, Physical Review Letters 124 (18), 187601 (2020).



Sujet de stage M2

Sujet: Interactions fortes dans les moirés de graphène

Laboratoire: Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés, Grenoble

Encadrante: Cécile Repellin

Contact: cecile.repellin@lpmmc.cnrs.fr

Description du stage

Les matériaux bidimensionnels tels que le graphène peuvent être 'empilés' de façon contrôlée pour accéder à de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans le graphène monocouche. Plus précisément, l'existence d'un petit angle de rotation entre deux couches de graphène crée un superréseau qui modifie la structure de bande. Dans les bicouches de graphène, les bandes de conduction et de valence sont parfaitement plates lorsqu'il y a un petit angle (ou angle magique) de rotation entre les deux couches [1]. En l'absence d'énergie cinétique dans ces bandes, les interactions entre électrons jouent un rôle prépondérant; remplir partiellement ces bandes permet de réaliser des états à N corps fortement corrélés. Par exemple, des expérimentateurs ont observé l'existence de supraconductivité et d'isolants corrélés dans les bicouches de graphène tournés à l'angle magique [2,3]. Depuis cette découverte, une pléthore d'autres phénomènes à N corps a été observée dans les moirés formés de deux, trois ou quatre couches de graphène. D'un point de vue théorique, il y a encore beaucoup de progrès à faire pour comprendre ces phénomènes.

Le but de ce stage est de déterminer si des phases quantiques combinant brisure de symétrie et topologie peuvent être réalisées dans les moirés de graphène. Nous nous concentrerons sur les moirés dont la bande de valence quasi-plate a une conductivité de Hall $C \frac{e^2}{h}$, où $C \neq 0$ est un invariant topologique appelé le nombre de Chern [4]. Vous apprendrez à calculer numériquement le Hamiltonien à N corps décrivant les électrons en interaction dans cette bande, et à déterminer son spectre énergétique et son état fondamental en utilisant les diagonalisations exactes [5]. Vous analyserez les propriétés de ces spectres énergétiques et calculerez des observables de l'état fondamental pour déterminer la nature de l'état fondamental pour divers facteurs de remplissage de la bande de valence et pour divers paramètres réalistes.

Ce stage pourra être poursuivi en thèse.

References

1. R. Bistritzer and A. H. MacDonald, Moiré bands in twisted double-layer graphene, Proceedings of the National Academy of Sciences 108, 12233 (2011).
2. Y. Cao, V. Fatemi, A. Demir, S. Fang, S. L. Tomarken, J. Y. Luo, J. D. Sanchez-Yamagishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras, R. C. Ashoori, P. Jarillo-Herrero, Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices, Nature 556, 80 (2018).
3. Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras, P. Jarillo-Herrero, Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices, Nature 556, 43 (2018).
4. Y.H. Zhang, D. Mao, Y. Cao, P. Jarillo-Herrero, T. Senthil, Nearly flat Chern bands in moiré superlattices, Physical Review B 99 (7), 075127 (2019).
5. C. Repellin, Z. Dong, Y.H. Zhang, T. Senthil, Ferromagnetism in narrow bands of moiré superlattices, Physical Review Letters 124 (18), 187601 (2020).