

## Sujet de stage:

Effet des interactions sur les propriétés topologiques de jonctions Josephson multiterminales

## Résumé:

Il y a actuellement un fort effort de recherche pour réaliser de nouvelles phases de la matière qui admettent des états topologiquement protégés à leurs bords. Une voie prometteuse consiste à combiner différents matériaux conventionnels pour obtenir des hétérostructures présentant ces propriétés. Les jonctions Josephson multiterminales formées entre des supraconducteurs conventionnels peuvent être elles-mêmes considérées comme des matériaux topologiques. Par exemple, des jonctions à 4 terminaux peuvent admettre des états liés topologiquement protégés à énergie nulle et qui réalisent ce qu'on appelle des singularités de Weyl. Leur existence peut être révélée grâce à une transconductance quantifiée, comme dans l'effet Hall quantique, mais en absence de champ magnétique. Le but du projet sera d'explorer cette idée récente en étudiant d'un point de vue théorique la robustesse de cette prédiction en présence de répulsion Coulombienne à l'intérieur de la jonction. En particulier, la présence de singularités de Weyl sera analysée dans un modèle concret d'îlot quantique pour la jonction.

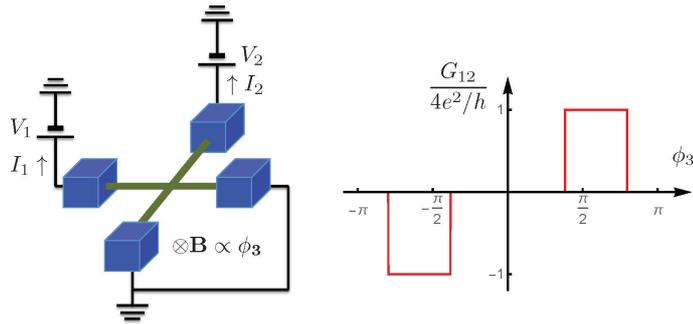
## Sujet détaillé:

Les phases topologiques de la matière suscitent actuellement beaucoup d'intérêt. L'existence d'isolants topologiques a été démontrée par plusieurs expériences récentes [1]. Les premières signatures de l'existence de semi-métaux de Weyl ont aussi été obtenues [2]. En revanche, il n'existe pas encore d'expérience concluante sur l'existence de supraconducteurs topologiques. Une direction prometteuse pour la découverte de telles phases topologiques consiste à former des hétérostructures aux propriétés exotiques en combinant différents matériaux conventionnels [3].

Comme nous l'avons prédit récemment, une jonction Josephson à plusieurs terminaux peut être considérée comme un matériau topologique [4]. En effet, il existe une connexion intime entre l'effet Josephson - un courant non dissipatif circulant entre deux supraconducteurs séparés par une interface - et la formation d'états liés d'Andreev localisés au voisinage de cette interface et dont l'énergie est plus petite que le gap supraconducteur. La topologie nous apprend qu'il y a plus d'information dans les fonctions d'onde que dans le spectre [5]. C'est aussi le cas pour les états d'Andreev. En particulier, nous avons montré que des jonctions Josephson à  $n$  terminaux supraconducteurs peuvent fournir une réalisation simple de matériaux topologiques ajustables en  $n-1$  dimensions. En particulier, pour  $n \geq 4$ , le spectre d'Andreev de la jonction peut admettre des singularités de Weyl dans l'espace des  $n-1$  différences de phases supraconductrices indépendantes, qui jouent le rôle de quasi-impulsions de la structure de bande. Ces singularités de Weyl correspondent à des états liés topologiquement protégés d'énergie nulle.

Dans des jonctions Josephson à plusieurs terminaux, la présence de singularités de Weyl autorise des transitions topologiques qui pourraient se manifester expérimentalement par des changements de la transconductance quantifiée en unités de  $4e^2/h$  entre deux terminaux polarisés en tension. La quantification de la transconductance sonde le premier nombre de Chern dans un sous-espace à deux dimensions de l'espace des  $n-1$  phases. Il s'agit donc d'un effet similaire à l'effet Hall quantique entier.

Le but du projet sera d'explorer davantage l'idée théorique introduite dans notre travail et de préciser les conditions pour son observabilité. En particulier, on étudiera la robustesse de cette prédiction dans un modèle spécifique d'une jonction à 4 terminaux faiblement couplés à un petit nombre de niveaux discrets dans un îlot quantique. On commencera par étudier les conditions pour l'apparition et la fusion de points de Weyl en l'absence d'interaction. On examinera ensuite quelles modifications du spectre peuvent être attendues en présence de répulsion Coulombienne locale. Suite à la suggestion récente de l'émergence de parafermions induits par les interactions dans des jonctions entre 2 terminaux supraconducteurs topologiques [6], on étudiera si un effet Hall quantique fractionnaire pourrait être envisagé dans une jonction à 4 terminaux.



**Figure:** A gauche: schéma d'une jonction Josephson entre plusieurs terminaux supraconducteurs (en bleu) reliés par une région normale (en vert). Un champ magnétique contrôle la différence de phase supraconductrice entre deux des terminaux, tandis que deux autres sont polarisés en tension. A droite: Quantification de la transconductance en fonction de la différence de phase supraconductrice.

A long terme, la relative simplicité des jonctions Josephson topologiques à plusieurs terminaux pourrait être importante pour des applications en ingénierie quantique avec des dispositifs supraconducteurs. En effet, la nature topologique des effets étudiés pourrait conduire à des applications dans les domaines de l'information quantique topologiquement protégée, ainsi que de la métrologie.

- [1] M.Z. Hasan and C.L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010), <http://arxiv.org/abs/1002.3895>
- [2] S.Y. Xu et al., Science **349**, 613 (2015), <http://arxiv.org/abs/1502.03807>
- [3] J. Alicea, Rep. Prog. Phys. **75**, 076501 (2012), <http://arxiv.org/abs/1202.1293>
- [4] R.-P. Riwar, M. Houzet, J.S. Meyer, and Yu.V. Nazarov, Nature Commun. **7**, 11167 (2016), <http://arxiv.org/abs/1503.06862>
- [5] M. Nakahara, "Geometry, Topology and Physics", IOP Ed.
- [6] Fan Zhang and C.L. Kane, Phys. Rev. Lett. **113**, 036401 (2014), <http://arxiv.org/abs/1404.1072>

voir aussi : [http://inac.cea.fr/en/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast.php?t=fait\\_marquant&id\\_ast=1172](http://inac.cea.fr/en/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=1172)

### Compétences requises :

Le projet proposé utilisera principalement les méthodes analytiques de la théorie des champs appliquée à la physique de la matière condensée. Il pourra aussi comporter des aspects numériques.

Les candidats intéressés auront de bonnes bases en mécanique quantique, physique statistique et physique du solide.

**Le stage pourra se poursuivre par une thèse.**

### Contact :

Manuel Houzet  
 DRF/INAC/PHELIQS/GT  
[manuel.houzet@cea.fr](mailto:manuel.houzet@cea.fr)  
<http://inac.cea.fr/Pisp/manuel.houzet>  
 Tel : 04.38.78.90.44