

## **Mécanismes de couplage charge-spin dans les semi-conducteurs :**

Les technologies d'aujourd'hui reposent sur l'électronique pour transmettre ou recevoir des informations. C'est le mouvement des électrons dans les semi-conducteurs, tel que le Silicium, qui est utilisé pour représenter et transporter de l'information numérique. Le transistor, inventé en 1948, est la composante fondamentale des processeurs, et il a deux états de fonctionnement (qui représentent des « 1 » ou des « 0 ») selon la résistance qui s'oppose au mouvement des électrons qui le traversent. Aujourd'hui, la miniaturisation des transistors atteint des limites difficiles à dépasser (quelques millions de transistors sur un millimètre carré), surtout à cause de la dissipation de la chaleur produite par des courants sur des surfaces si petites.

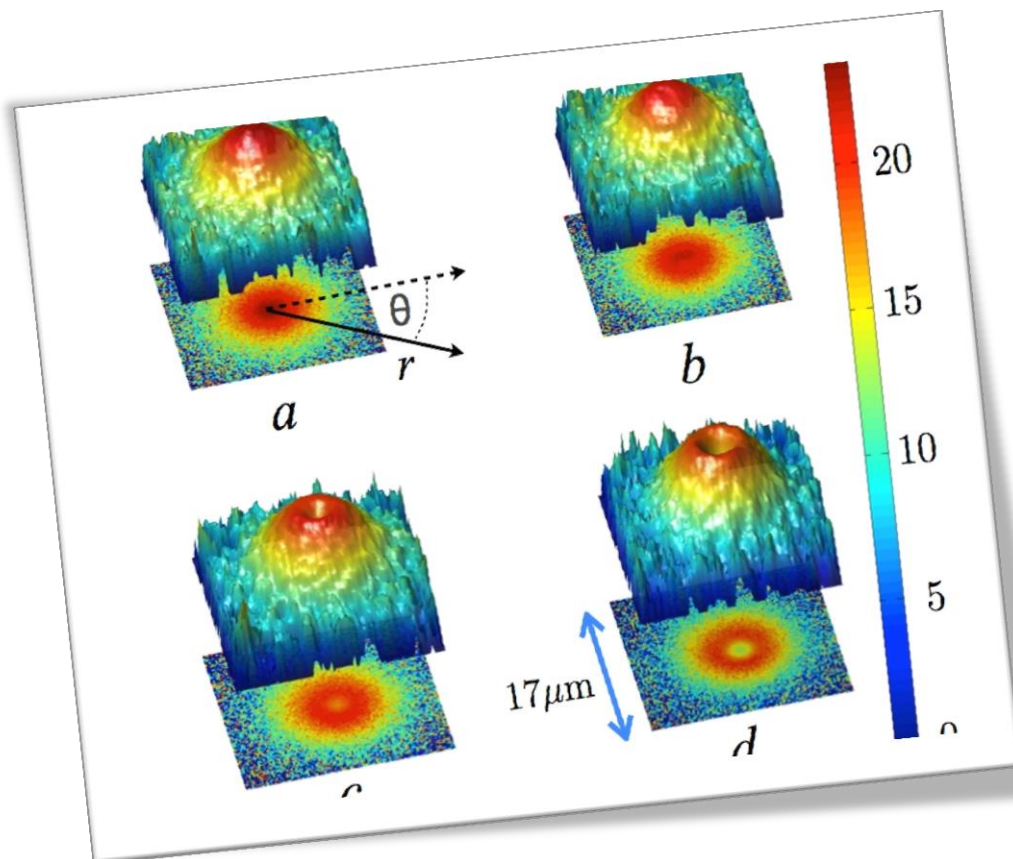
L'électron, en plus d'avoir une charge électrique, possède une autre propriété fondamentale appelée spin, grandeur physique qui peut donner seulement deux valeurs lors d'une mesure : 'up' ou 'down'. C'est donc un très bon candidat pour représenter de l'information numérique ! L'électronique de spin est la technologie émergente que vise justement à utiliser le spin de l'électron (en plus de sa charge) pour gérer de l'information, avec le but de construire des nouveaux dispositifs plus efficaces, plus rapides et moins exigeants au niveau de leur consommation d'énergie.

Différents processus physiques interviennent à l'heure de construire un dispositif spintronique. On doit tout d'abord être capables de donner aux électrons une orientation particulière de leur spin. Dans un semi-conducteur non magnétique à l'équilibre, le nombre d'électrons avec spin « up » et « down » sont identiques, et on dit que les électrons ne sont pas polarisés. Inversement, si tous les électrons ont le même spin, on parle d'électrons 100 % polarisés. Deuxièmement, il faut pouvoir transporter cette information d'un point à l'autre dans le semi-conducteur. Mon travail de thèse vise à mieux comprendre ce transport du spin dans les semi-conducteurs. Différents effets ont été découverts dans les dernières années, dont deux exemples célèbres sont le spin-coulomb drag et l'effet hall de spin.

On étudie alors le transport diffusif des électrons polarisés dans le GaAs (Arséniure de Gallium). Quand un électron de conduction se propage dans le matériau, il change la direction de son mouvement de façon aléatoire avec un temps caractéristique qui dépend des différents mécanismes de diffusion que l'électron peut subir. Plus ce temps est long, plus l'électron peut s'éloigner du point d'origine au cours de son temps de vie. Les électrons sont excités dans la bande de conduction et polarisés à 50 % par l'absorption d'un laser polarisé circulairement (c'est le pompage optique dont la découverte dans les semi-conducteurs est racontée dans les Newsletters du septembre et d'octobre 2013). Le laser est fortement focalisé sur une surface de l'ordre du micromètre carré, et les électrons diffusent pendant leur temps de vie dans la bande de conduction dans toutes les directions s'éloignant de la tache excitatrice. Quand les électrons relaxent leur énergie et quittent la bande de conduction, ils émettent de la lumière dont le taux de polarisation circulaire est proportionnel à la polarisation des électrons au moment de l'émission. Grâce à un microscope, on peut donc construire une image de la répartition de la distribution électronique et en même temps de sa polarisation de spin.

Typiquement, les électrons perdent leur polarisation au cours du temps pendant leur mouvement dans le matériau. La Figure suivante montre des images de la polarisation de la luminescence (égale à la polarisation électronique à un facteur  $\frac{1}{2}$  près) en fonction de l'espace et à différentes puissances d'excitation sur du GaAs à basse température (15 K).

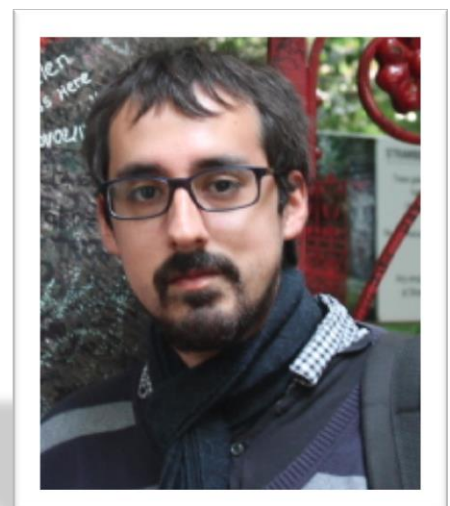
Les figures *a,b,c,d* correspondent aux images obtenues en faisant varier la puissance d'excitation, autrement dit, en faisant varier le nombre d'électrons photocréés.



Comme illustrent *a* et *b* (faible puissance lumineuse), la polarisation des électrons est maximale à l'endroit où ils sont créés, et ensuite cette polarisation diminue progressivement en fonction de la distance parcourue par les électrons. Finalement, l'information contenue dans la polarisation électronique est complètement perdue au bout de quelques dizaines de microns.

Or, on montre que la polarisation des électrons peut en fait augmenter pendant la diffusion, à condition d'augmenter la puissance d'excitation. Ceci est une conséquence d'une loi fondamentale de la mécanique quantique, connue sous le nom de Principe de Pauli. Ce principe nous dit que deux électrons ne peuvent pas occuper le même état quantique (caractérisé par le spin et par la probabilité en tout point de trouver l'électron). Pour que les mécanismes de diffusion de l'impulsion se produisent de façon efficace, il faut que l'état final de l'électron soit disponible. Or, si la densité d'électrons polarisés avec un spin donné (par exemple « up ») devient comparable à la densité d'états accessibles (environ  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dans le GaAs), l'état final a une forte probabilité d'être occupé par un autre électron du même spin, la diffusion de l'impulsion devient alors moins probable pour ce type d'électrons (on parle de blocage de Pauli) et ils parcourent des distances plus grandes par rapport aux électrons avec spin « down ». Ceci explique les résultats des figures *c* et *d*, sur lesquelles on observe une diminution de la polarisation électronique au centre puis un maximum de polarisation à une distance de 2 microns du centre de la tache de luminescence.

Même si le principe de Pauli est connu depuis les années 20, et que nombre de ses conséquences sont observées sur des systèmes très variés (liaisons chimiques, gaz atomiques, étoiles à neutrons), ses effets sur le transport de spin dans les solides n'a jamais été explicité jusqu'à maintenant. L'observation des effets comme le blocage de Pauli dans les solides est important pour mieux concevoir les applications où le spin de l'électron est utilisé pour écrire et transmettre de l'information. En utilisant des systèmes de dimensionnalité réduite (puits quantiques, nanofils), on pourrait obtenir plus facilement des densités suffisamment élevées pour que le principe de Pauli intervienne à l'échelle macroscopique.



Ces résultats seront discutés plus en détail le 21 novembre prochain lors du séminaire du laboratoire.

*Pour en savoir plus :*

The effect of Pauli blockade on spin-dependent diffusion in a degenerate electron gas ([arXiv:1309.6451](https://arxiv.org/abs/1309.6451))

*Fabian Cadiz*