



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

Nouvel état optique spin-orbital dans des nanostructures plasmoniques

Equipe d'accueil :

Institut FEMTO-ST / Département Optique / Equipe Nano-optique

Directeur de thèse :

Thierry Grosjean (Directeur de recherche CNRS)

Thierry.grosjean@univ-fcomte.fr

+33 (0)3 81 66 64 17

Financement :

MESRI (bourse ministérielle)

Date de commencement :

Autour du 1^{er} octobre 2023

Date limite de candidature

07 juin 2023

Contexte scientifique et objectif :

Les ondes optiques possèdent, au-delà de leur énergie et de leur moment linéaire, du moment cinétique (encore appelé moment angulaire). Le moment angulaire quantifie l'idée de rotation ou d'hélicité de la lumière : la rotation continue de la polarisation de la lumière porte du moment angulaire dit de spin, tandis que la structure de phase hélicoïdale ou la rotation du champ de la lumière produit du moment angulaire orbital [1,2]. Ces deux contributions de spin et orbitales du moment angulaire sont des degrés de liberté de polarisation et d'espace de la lumière, respectivement [1]. Ces deux composantes sont indépendantes dans les faisceaux paraxiaux, mais deviennent intrinsèquement couplées dans les champs lumineux non-paraxiaux et/ou inhomogènes [2,3]. Ce phénomène, baptisé interaction spin-orbite optique (SOI en anglais), a récemment suscité un fort intérêt académique et industriel, tant du point de vue fondamental que

du point de vue applicatif [4-6]. Les phénomènes de SOI jouent un rôle crucial dans l'optique moderne à petite échelle, incluant la nanophotonique et la plasmonique [6-9].

Des analogies ont très récemment été mises en évidence entre les effets de spin électroniques et optiques. De nombreuses manifestations du couplage spin-orbite électronique existent dans les matériaux magnétiques, incluant par exemple l'apparition de vortex nanométriques de spins d'électron appelés skyrmions [10]. Bénéficiant d'une protection « topologique », ces modes sont extrêmement robustes aux perturbations de leur environnement, les rendant très performants entre autres pour le traitement et la sauvegarde de l'information. En 2018, il a été montré pour la première fois l'existence de distributions de spin plasmoniques identiques à celles des skyrmions magnétiques, baptisées « skyrmions optiques » [11]. Tout comme leur équivalent électronique, les skyrmions optiques sont « topologiquement protégés » et ouvrent ainsi de nouvelles perspectives pour un traitement de l'information classique et quantique mais également dans le domaine de la métrologie, de l'imagerie hyper-résolue, etc.

Nous proposons la transposition vers l'optique d'une autre manifestation du couplage spin-orbite dans les matériaux magnétiques. L'objectif est l'étude et la démonstration d'un nouvel état photonique impliquant un couplage spin-orbite optique dans des nano-antennes plasmoniques. Ce nouvel état électromagnétique offre de nouveaux degrés de liberté dans la manipulation de la lumière (et de l'interaction lumière-matière) et ouvre la voie vers une "spin-optique" classique et quantique intégrée.

- [1] Allen, L., Beijersbergen, M. W., Spreeuw, R. J. C., & Woerdman, J. P. (1992). Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Phys. Rev. A*, *45*, 8185.
- [2] Bliokh, K. Y., Rodríguez-Fortuño, F. J., Nori, F., & Zayats, A. V. (2015). Spin-orbit interactions of light. *Nat. Photonics*, *9*, 796
- [3] Bliokh, K. Y., Ostrovskaya, E. A., Alonso, M. A., Rodríguez-Herrera, O. G., Lara, D., & Dainty, C. (2011). Spin-to-orbital angular momentum conversion in focusing, scattering, and imaging systems. *Opt. Express*, *19*, 26132.
- [4] Liu, S., Chen, S., Wen, S., & Luo, H. (2022). Photonic spin Hall effect: fundamentals and emergent applications. *Opt. Electron. Sci.*, *1*(7), 220007-1.
- [5] Dorney, K. M., Rego, L., Brooks, N. J., San Román, J., Liao, C. T., Ellis, J. L., ... & Hernández-García, C. (2019). Controlling the polarization and vortex charge of attosecond high-harmonic beams via simultaneous spin-orbit momentum conservation. *Nat. Photonics*, *13*, 123
- [6] Guo, Y., Zhang, S., Pu, M., He, Q., Jin, J., Xu, M., ... & Luo, X. (2021). Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation. *Light Sci. Appl.*, *10*, 63.
- [7] Petersen, J., Volz, J. & Rauschenbeutel, A. (2014). Chiral nanophotonic waveguide interface based on spin-orbit interaction of light. *Science* *346*, 67
- [8] Rodríguez-Fortuño, F. J., Marino, G., Ginzburg, P., O'Connor, D., Martínez, A., Wurtz, G. A., & Zayats, A. V. (2013). Near-field interference for the unidirectional excitation of electromagnetic guided modes. *Science*, *340*, 328.
- [9] Lin, J., Mueller, J. B., Wang, Q., Yuan, G., Antoniou, N., Yuan, X. C., & Capasso, F. (2013). Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons. *Science*, *340*, 331.
- [10] U. K. Rossler, A.N. Bogdanov, C. Pfleiderer, Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals. *Nature* *442*, 797-801 (2006).
- [11] Du, L., Yang, A., Zayats, A. V., & Yuan, X. (2019). Deep-subwavelength features of photonic skyrmions in a confined electromagnetic field with orbital angular momentum. *Nat. Physics*, *15*, 650.

Plan de thèse :

- Travail bibliographique, compréhension des effets physiques magnétiques et optiques sous-jacents
- Modélisation des nanostructures envisagées et simulation numérique de leurs propriétés optiques (méthode FDTD principalement, logiciel commercial)
- Participation à la fabrication des structures plasmoniques en salle blanche (plateforme technologique MIMENTO). L'équipe de recherche fédérée autour du projet dispose de tout le savoir-faire technologique nécessaire pour la fabrication des structures de la thèse.
- Caractérisation des propriétés intrinsèques des états optiques. Mise en œuvre de techniques dites « en champ lointain » : imagerie dans le plan de Fourier d'un objectif de microscope et polarimétrie. Les nanostructures seront analysées sur un banc optique intégré à un microscope inversé et piloté par ordinateur (Labview). Le système est déjà opérationnel.
- Manipulation des nouveaux états optiques, démonstration expérimentale.

Profil demandé :

Nous recherchons un étudiant très motivé et prêt à s'investir dans le domaine de l'optique sublongueur d'onde.

- Diplôme Bac+5 en optique
- Connaissances avancées en nanophotonique et/ou en plasmonique
- Bon niveau en physique
- Bonnes capacités d'analyse, de synthèse et de communication.
- Bonne expérience ou goût prononcé pour les simulations numériques (la méthode FDTD sera utilisée via un logiciel commercial) et pour les méthodes expérimentales.
- Compétences en programmation, en particulier sur Octave/Matlab
- Il n'est pas nécessaire d'avoir des connaissances approfondies dans le domaine du magnétisme.
- Bonne connaissance de l'anglais écrit et parlé
- Bon comportement en matière de communication et d'information, méthode de travail structurée et axée sur les objectifs, esprit d'initiative et engagement, capacité à travailler en équipe, volonté de coopérer et volonté d'apprendre.

Références bibliographiques de l'équipe d'accueil en lien direct avec le sujet :

Lefier, Y., & Grosjean, T. (2015). Unidirectional sub-diffraction waveguiding based on optical spin-orbit coupling in subwavelength plasmonic waveguides. *Opt. Lett.*, *40*, 2890.

Lefier, Y., Salut, R., Suarez, M. A., & Grosjean, T. (2018). Directing nanoscale optical flows by coupling photon spin to plasmon extrinsic angular momentum. *Nano Lett.*, *18*, 38.

Wang, M., Salut, R., Lu, H., Suarez, M. A., Martin, N., & Grosjean, T. (2019). Subwavelength polarization optics via individual and coupled helical traveling-wave nanoantennas. *Light Sci. Appl.*, *8*, 76.

Wang, M., Salut, R., Suarez, M. A., Martin, N., & Grosjean, T. (2019). Chiroptical transmission through a plasmonic helical traveling-wave nanoantenna, towards on-tip chiroptical probes. *Opt. Lett.*, *44*, 4861.

Wang, M., Huang, Z., Salut, R., Suarez, M. A., Lu, H., Martin, N., & Grosjean, T. (2021). Plasmonic helical nanoantenna as a converter between longitudinal fields and circularly polarized waves. *Nano Lett.*, *21*, 3410.

Karakhanyan, V., Lefier, Y., Eustache, C., & Grosjean, T. (2021). Optomagnets in nonmagnetic plasmonic nanostructures. *Opt. Lett.*, *46*(3), 613-616.

Karakhanyan, V., Eustache, C., Lefier, Y., & Grosjean, T. (2021). Plasmon-induced 0.13 T optomagnetic field in a gold coaxial nanoaperture. *OSA Continuum*, *4*, 1598.

Karakhanyan, V., Eustache, C., Lefier, Y., & Grosjean, T. (2022). Inverse Faraday effect from the orbital angular momentum of light. *Phys. Rev. B*, *105*, 045406.