

**Titre de la thèse : Nouvel état spin-orbital optique dans des nanostructures plasmoniques**

**Laboratoire d'accueil : Institut FEMTO-ST**

**Spécialité du doctorat préparé : SPIM**

**Mots-clefs :**

Plasmonique, chiralité, nano-antennes, moments angulaires/cinétiques optiques, moment angulaire de spin, moment angulaire orbital, couplage spin-orbite, nouvel état photonique.

**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.

#### **Références bibliographiques de l'équipe d'accueil en lien 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.

**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.

**Financement :** MESRI établissement

Début du contrat : 01/10/2023

**Direction de la thèse :**

Thierry Grosjean (Directeur de recherche CNRS)

Equipe Nano-optique / Département Optique

[Thierry.grosjean@univ-fcomte.fr](mailto:Thierry.grosjean@univ-fcomte.fr)

+33 (0)3 81 66 64 17



**PhD title: Novel spin-orbital optical state in plasmonic nanostructures**

**Host laboratory: FEMTO-ST Institute**

**Speciality of PhD: SPIM**

**Keywords: Plasmonics, chirality, nano-antennas, optical angular momentum, spin angular momentum, orbital angular momentum, spin-orbit coupling**

**Scientific context and objective:**

In addition to their energy and linear momentum, optical waves possess spin and orbital angular momentum (SAM and OAM), which are polarization and spatial degrees of freedom of light, respectively [1]. These components quantify the idea of rotation or helicity of light: the continuous polarization rotation of light carries the SAM, while the helical phase structure or field pattern rotation of light produces OAM [2]. Whereas these two components are independent in paraxial beams, they become intrinsically coupled in light fields with high nonparaxiality and/or inhomogeneity [2,3]. This phenomenon, called optical spin-orbit interaction (SOI) has recently attracted much attention from fundamental and application point-of-views [4-6]. The SOI phenomena play crucial roles in modern optics dealing with sub-wavelength scale systems, including nano-photonics and plasmonics [6-9].

Analogies between electronic and optical spin effects have recently been demonstrated. Numerous manifestations of electron spin-orbit coupling exist in magnetic materials, including nanoscale electron spin vortices called skyrmions [10]. Benefiting from a "topological protection", these modes are extremely robust to perturbations of their environment, making them very efficient for information processing, data storage, and many other applications. In 2018, the existence of a plasmonic analog of the magnetic skyrmions, called "optical skyrmions", was shown for the first time [11]. Like their electronic counterpart, optical skyrmions are "topologically protected" and thus offers new prospects for classical and quantum information processing but also in the fields of metrology, subwavelength imaging, etc.

We propose the transposition to optics of another manifestation of spin-orbit coupling in magnetic materials. The objective is to demonstrate a new photonic state involving optical spin-orbit coupling in plasmonic nanoantennas. This new chiral electromagnetic mode opens new degrees of freedom in the manipulation of light and paves the way towards integrated classical and quantum "spin-optics".

[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.

### Workplan:

- Bibliographic research
- Modeling of the plasmonic structures and numerical simulation of their optical properties (FDTD method mainly, commercial software)
- Fabrication of the systems in clean room by combining different technologies.
- Characterization of the intrinsic properties of the optical states. Implementation of "far field" techniques: imaging in the Fourier plane of a microscope objective and polarimetry. The nanostructures will be analyzed with an optical bench integrated to an inverse microscope and controlled with a computer (with Labview). The system is already operational.
- First manipulation of the new optical states, experimental demonstration.

### Bibliographic references of the host team related to the subject:

- 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.

**Applicant profile:**

We are seeking a highly motivated student ready to invest in the field of subwavelength optics:

- Good university degree (Master level) in optics or nanotechnologies
- Advanced knowledge in nanophotonics and/or plasmonics
- Good level in physics
- Good experience or interest in numerical simulations (FDTD method will be used via commercial software) and experimental methods.
- Programming skills, especially with Octave/Matlab
- It is not necessary to have extensive knowledge in the field of magnetism.
- Good written and spoken English skills (French skills welcome)
- Good communication and information behavior, goal-oriented and structured way of working, initiative/commitment, ability to work in a team and willingness to cooperate as well as willingness to learn.

**Financing Institution: MESRI**

**Application deadline :**

**Start of contract :**

**Thesis Supervisor(s):**

Thierry Grosjean (Directeur de recherche CNRS)

Nano-optics team / Optics Department

[Thierry.grosjean@univ-fcomte.fr](mailto:Thierry.grosjean@univ-fcomte.fr)

+33 (0)3 81 66 64 17