

Sujet 1 : Emission spontanée à deux photons à proximité de nanostructures plasmoniques (Encadrant : Steve Smeets)

L'émission spontanée est un processus fondamental dans le domaine de l'interaction rayonnement-matière. Parmi les transitions dites interdites, l'émission spontanée à deux photons (Fig. 1) est un processus d'ordre deux qui est 8 à 10 ordres de grandeur plus lent que l'émission à un seul photon. Néanmoins, contrôler et comprendre ce processus promet, par exemple, la conception de sources efficaces de photons intriqués pour les ordinateurs quantiques.

Pour ce faire, il est pertinent de placer l'émetteur quantique (atome, molécule, quantum dot...) à proximité de nanostructures supportant des plasmons de surface. En effet, dans ces structures la lumière est confinée à une échelle inférieure à celle de la longueur d'onde ce qui a pour effet d'augmenter, via l'effet Purcell, le taux d'émission spontanée à deux photons de plusieurs ordres de grandeurs [1]. Par exemple, placer un atome d'hydrogène 10 nm en dessous d'un nanodisque d'argent de 25 nm de diamètre a pour effet d'augmenter le taux d'émission d'une paire de photon de 5 ordres de grandeur (Fig. 2) [2] !

L'objectif du travail proposé est d'étudier et de calculer le spectre d'émission spontanée à deux photons d'un atome d'hydrogène placé à proximité de différentes nanostructures plasmoniques. Par exemple lorsque l'émetteur est placé entre deux nanodisques. Pour ce faire, après s'être familiarisé avec le formalisme théorique, le logiciel de simulations COMSOL sera utilisé.

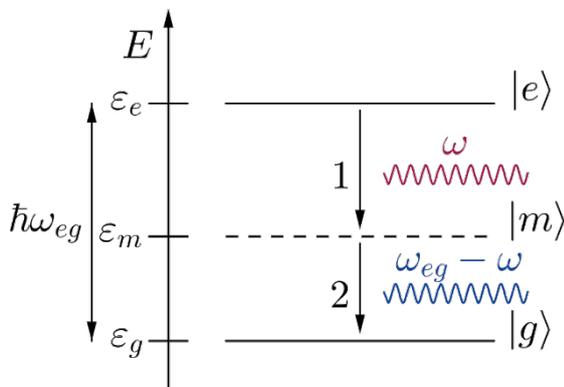


Figure 1 – Transition d'ordre deux : un émetteur dans un état excité émet un premier photon à une fréquence ω et ensuite un second à une fréquence $\omega_{eg} - \omega$ depuis un état virtuel intermédiaire.

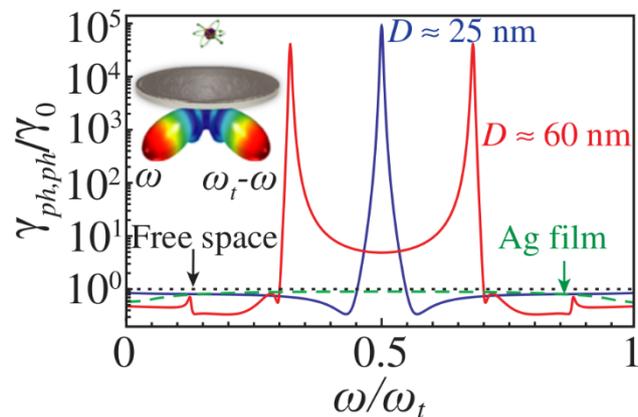


Figure 2 – Spectre du taux d'émission spontanée de deux photons de l'émetteur proche d'un nanodisque d'argent normalisé par le taux d'émission dans le vide [2].

Bibliographie :

- [1] Rivera, N., Kaminer, I., Zhen, B., Joannopoulos, J. D., & Soljačić, M. (2016). Shrinking light to allow forbidden transitions on the atomic scale. *Science*, 353 (6296), 263-269.
 [2] Y. Muniz, A. Manjavacas, C. Farina, D. A. R. Dalvit, and W. J. M. Kort-Kamp *Phys. Rev. Lett.* 125, 033601, 2020.

Sujet 2 : Caractériser une métasurface chirale PT-symétrique (Encadrant : Alice De Corte)

Un métamatériau est un ensemble de structures photoniques se répétant périodiquement dans deux dimensions (métasurface, voir fig (i)) ou trois dimensions, selon une période plus faible que la longueur d'onde utilisée. L'étude de ces matériaux a gagné en ampleur ces dernières années, car ils peuvent présenter des caractéristiques physiques impossibles à obtenir dans des matériaux naturels, tels qu'une permittivité proche de zéro ou un indice de réfraction négatif. [1]

Un objet chiral est un objet ne pouvant pas être superposé à son image dans un miroir. Des structures photoniques peuvent être chirales par leur géométrie – l'exemple le plus courant est celui de la spirale (Fig. (ii)) – mais il existe aussi des matériaux chiraux, formés de molécules ou de cristaux ayant une structure chimique particulière. Leur intérêt réside dans leur réponse différente à la lumière de polarisation circulaire gauche (LCP) ou droite (RCP). La polarisation droite sera par exemple plus absorbée ou reflétée, tandis que la gauche sera mieux transmise à travers la structure. [2] L'arrangement de telles structures en un métamatériau découple cette réponse chirale, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications de contrôle de la polarisation. [3]

Une autre propriété de systèmes optiques pouvant créer des effets inédits est la symétrie Parité-Temps (PT). À l'origine étudiée comme propriété des systèmes non-Hermitiens en mécanique quantique, elle peut être observée dans des systèmes optiques possédant un profil équilibré de gain et de perte, par exemple avec une antisymétrie dans l'indice de réfraction imaginaire du système (Fig. (iii)). [4] Implémenter la symétrie PT dans une métasurface chirale peut donc donner lieu à des comportements optiques inhabituels. [3]

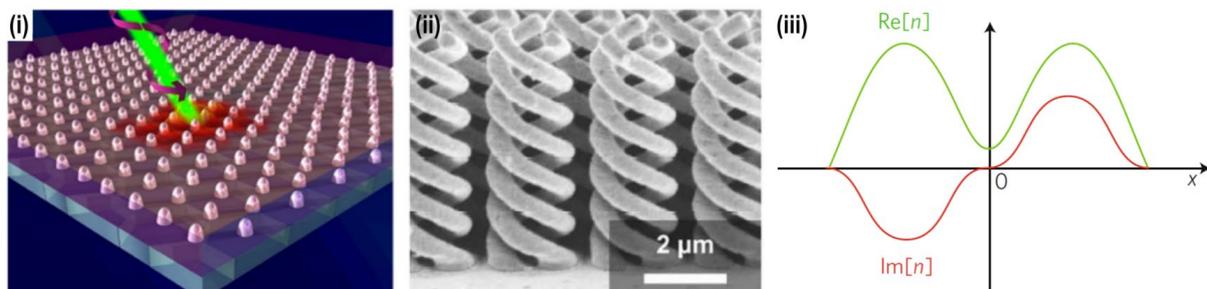


Figure 1 - (i) Exemple de métasurface chirale faite de cônes tronqués. Figure 3b(i) de la réf. [1] (ii) Exemple de structure chirale faite de 3 spirales entrelacées. Figure 1c de la réf. [2]. (iii) Exemple de profil d'indice de réfraction adapté pour une structure PT-symétrique. Figure 1a de la réf [4].

Durant ce travail, vous utiliserez un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode modale de Fourier (Rigorous Coupled Wave Analysis) afin de modéliser une métasurface chirale PT-symétrique. Vous étudierez ensuite ses propriétés optiques de diffusion de la lumière sous différentes polarisations, afin de caractériser la chiralité de sa réponse.

[1] Kim, J.; Rana, A.S.; Kim, Y.; Kim, I.; Badloe, T.; Zubair, M.; Mehmood, M.Q.; Rho, J., "Chiroptical Metasurfaces: Principles, Classification, and Applications," *Sensors*, 21, 4381 (2021).

[2] Hentschel M., M. Schäferling, X. Duan, H. Giessen, N. Liu, "Chiral plasmonics," *Sci. Adv.* 3, e1602735 (2017).

[3] Katsantonis I. et al., "Scattering Properties of PT-Symmetric Chiral Metamaterials", *Photonics*, 7, 43 (2020).

[4] Feng, L., R. El-Ganainy and L. Ge, "Non-Hermitian photonics based on parity-time symmetry," *Nat. Photonics*, 11, 752-762 (2017).

Sujet 3 : Étude de résonances dans des cristaux photoniques (Encadrant : Thomas Delplace)

Depuis plusieurs années, les chercheurs s'appliquent à développer de nouvelles structures permettant de contrôler au mieux le comportement de la lumière. De la production de photons uniques à des cavités résonantes, des multitudes de dispositifs ont été créés. Différents phénomènes sont exploités afin de contrôler le comportement de la lumière, mais depuis quelques années un phénomène potentiellement très utile a été mis en évidence : les BIC's (« Bound state In the Continuum »).

Un métamatériau est un matériau composite constitué de sous-structures géométriques se répétant généralement selon un certain paterne. Ces matériaux peuvent accepter différents modes pour la lumière : des modes « confinés » et des modes « radiatifs » (Fig.1a). Les modes confinés, comme leur nom l'indique, sont coincés dans le matériau et s'y propagent sans fuite vers l'extérieur. Ces modes se trouvent en dehors du cône de lumière (le cône de lumière renfermant tous les modes pouvant s'échapper à l'infini). Les modes radiatifs se trouvent dans le cône de lumière et permettent à la lumière de petit à petit s'échapper du matériau. Cependant, un type de résonance bien particulière permet d'avoir **des modes confinés dans le cône de lumière** : les BIC's.

Ces états particuliers se produisent lorsque certains paramètres sont rencontrés dans le matériau. Ces modes sont très robustes aux petites variations et permettent généralement de rester dans un mode très confiné (near- ou quasi-BIC). Récemment un nouveau type particulier de BIC a été mis en évidence : les UGR's (pour Unidirectional Guided Resonances). Les UGR's sont des BIC's uniquement dans une direction privilégiée, permettant ainsi de contrôler dans quelle direction laisser la lumière s'échapper.

Lors de ce travail, vous apprendrez à retrouver des BIC's et UGR's dans des structures déjà connues pour vous familiariser avec le logiciel de simulation COMSOL. Ensuite, l'étude sera étendue à d'autres structures plus exotiques permettant possiblement de mettre en évidence d'autres effets (p.ex. slot waveguide) combinés à un BIC ou un UGR.

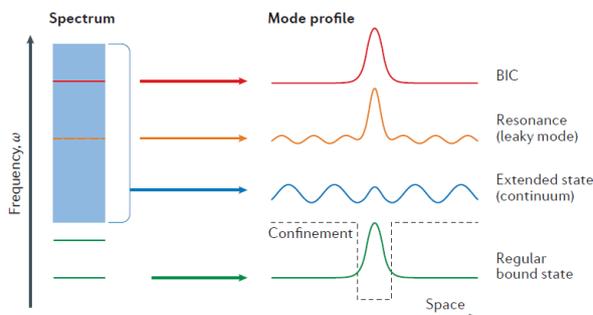
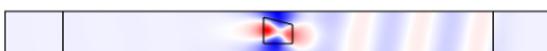


Figure : (Haut) Différents types de modes possibles dans un métamatériau, (Bas) Profil du champ électrique d'un BIC (confinement parfait) et d'un UGR, avec lumière qui échappe vers la droite.



[1] Hsu, C., Zhen, B., Stone, A. *et al.* Bound states in the continuum. *Nat. Rev. Mater.* **1**, 16048 (2016).



[2] Yin, X., Jin, J., Soljačić, M. *et al.* Observation of topologically enabled unidirectional guided resonances. *Nature* **580**, 467–471 (2020).

Sujet 4 : Propulsion laser d'une voile solaire : auto-stabilisation (Encadrant : Gilles Rosolen)

A mesure que l'on apprend à maîtriser la lumière, sa capacité à exercer une force et un moment de force permet de développer des outils puissants de manipulation de la matière. On peut par exemple citer la mise au point des « optical tweezer » (ou pinces optiques), qui a été récompensée par un prix Nobel en 2018 (Figure 1a). Le faisceau laser est façonné et focalisé de manière à piéger une particule que l'on peut ainsi déplacer précisément, menant à des applications en médecine, en biologie et en micro-fluidique. Plus récemment, l'intérêt s'est plutôt porté sur la dynamique de lévitation.

Plutôt que de façonner et focaliser le faisceau laser, on peut façonner la forme de la structure illuminée, ce qui a été plus récemment proposé [1-2]. Cela permet d'utiliser des faisceaux laser de plus grande intensité permettant de contrebalancer le poids de la structure illuminée, mais aussi d'éviter de placer la structure proche de la source. Ce genre de développements permettraient de faire léviter un objet à bonne distance de la source, mais aussi de développer des voiles solaires permettant un déplacement spatial à des vitesses relativistes.

Le problème actuellement est que ce genre de lévitation est instable (Figure 1b) : une légère perturbation ou inclinaison de la structure va l'expulser hors du faisceau... Il faut donc façonner ces structures pour qu'elles restent stables, ce qui est possible en structurant leur surface de manière adéquate (Figure 1c). Le stage combinera une partie théorique pour implémenter les forces et les moments de force agissant sur la structure, et une partie numérique pour calculer la réflexion et transmission de ces structures.

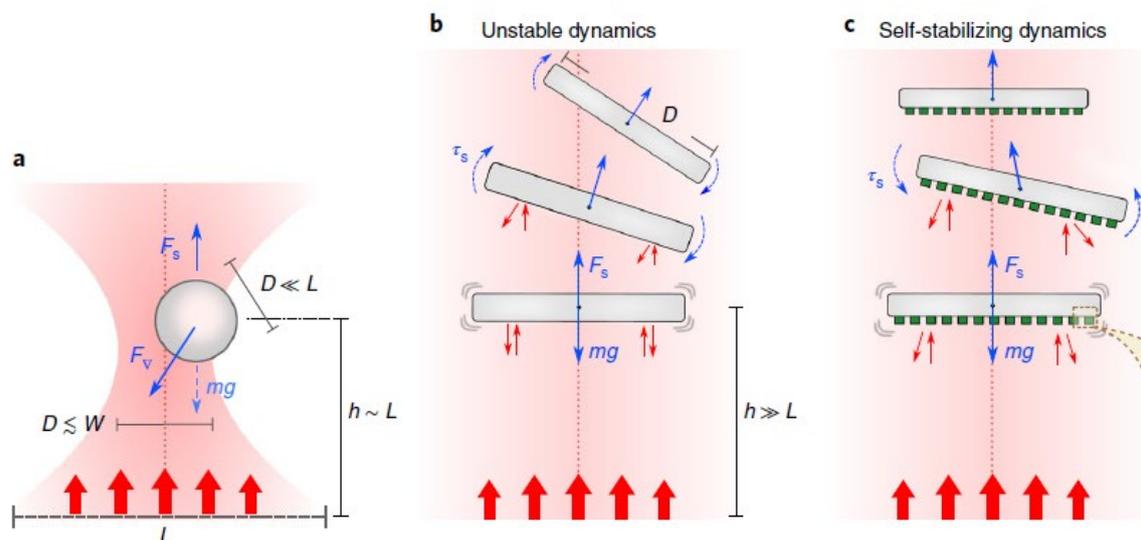


Figure 2 Méthodes pour l'auto-stabilisation de l'objet [2]. (a) Dans le cas des pinces optiques, l'objet est piégé dans le faisceau laser grâce à une focalisation du faisceau. (b) Un faisceau non-focalisé peut avoir assez d'intensité pour faire léviter un objet macroscopique, mais une légère perturbation peut expulser l'objet du faisceau. (c) En façonnant la surface, la structure peut s'auto-stabiliser et rester dans le faisceau laser.

[1] O. Ilic et al. *Exploiting Optical Asymmetry for Controlled Guiding of Particles with Light*, ACS Photonics 3 (2), 197–202, 2016.

[2] O. Ilic and H. A. Atwater, *Self-stabilizing photonic levitation and propulsion of nanostructured macroscopic objects*, Nature Photonics, volume 13, 289–29, 2019.