

Sujet 1 : Transitions photoniques d'ordre supérieur dans des nanostructures plasmoniques

L'interaction entre la lumière et la matière est un sujet d'actualité en photonique. En effet, de nombreuses recherches s'intéressent au contrôle et à la compréhension du comportement d'un émetteur quantique (un atome, une molécule, ...) proche de nanostructures. Ces recherches ont pour application, par exemple, d'améliorer l'imagerie à l'échelle nanométrique ou encore de concevoir des sources efficaces de photons intriqués pour les ordinateurs quantiques.

La présence de nanostructures, dont la taille est de l'ordre d'une dizaine ou d'une centaine de nanomètres, dans l'environnement photonique autour d'un émetteur a pour effet de modifier son comportement. En outre, les nanostructures qui supportent des plasmons sont des dispositifs capables de confiner la lumière à une échelle inférieure à celle de la longueur d'onde. Il en résulte que les champs électromagnétiques plasmoniques intenses, ainsi que le confinement des champs, ont pour effet d'augmenter le taux d'émission spontanée de la lumière émise par l'émetteur via l'effet Purcell de plusieurs ordres de grandeur.

Durant ce mémoire, nous allons nous intéresser aux transitions photoniques d'ordre supérieur, c'est-à-dire lorsque l'émetteur émet plusieurs photons lors de sa désexcitation, pour des émetteurs quantiques proches de nanostructures. En particulier des nanodisques couplés seront étudiés. Pour ce faire, le logiciel de simulations COMSOL sera utilisé.

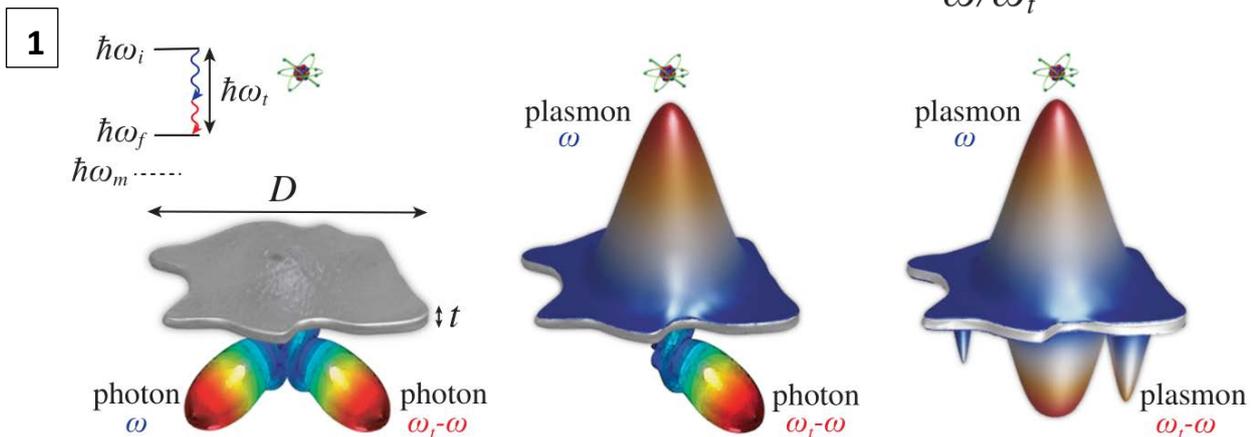
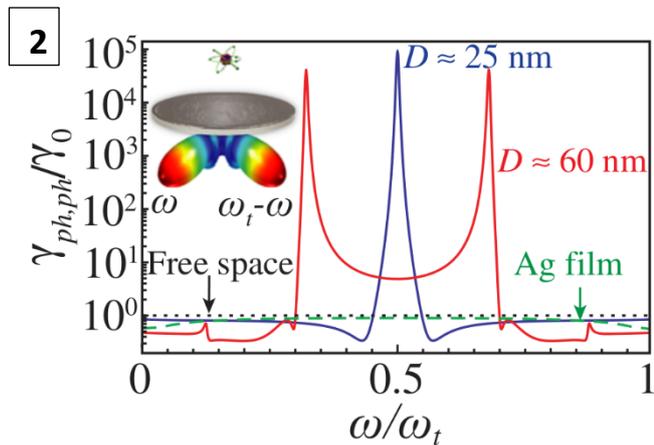


Figure 1 – Représentation schématique d'un système composé d'un émetteur placé à proximité d'un nanodisque supportant des modes plasmoniques. Trois voies de désexcitations sont possibles : une paire de photons, une paire hybride plasmon-photon ou une paire de plasmons [2]. Figure 2 – Spectre du taux d'émission spontanée de deux photons de l'émetteur proche d'un nanodisque d'argent normalisé par le taux d'émission dans le vide. Une augmentation de 5 ordres de grandeur est observée pour un disque de 25 nm de diamètre [2].

[1] Rivera, N., Kammer, I., Zhen, B., Joannopoulos, J. D., Soljačić, M. (2016). Shrinking light to allow forbidden transitions on the atomic scale. *Science*, 353, 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 : Conception numérique d'un détecteur Cherenkov compact et efficace

Lorsqu'une particule chargée traverse un milieu à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu, une radiation est émise, dite Cherenkov. L'émission se fait dans une direction qui dépend de la vitesse de la particule. C'est ainsi que des détecteurs Cherenkov (ring imaging detector - RICH) ont été conçus au CERN pour mesurer la vitesse des particules résultant d'une collision proton-proton. Il s'agit d'encombrant détecteurs (d'une taille de l'ordre du mètre) contenant un gaz très peu dense.

Outre leur problème d'encombrement, la sensibilité de ces détecteurs diminue avec la vitesse des particules. Des chercheurs tentent donc d'améliorer ces détecteurs en structurant le milieu que la particule doit traverser. A l'aide de structures photoniques, il est possible d'améliorer la détection, mais le tout est de trouver la bonne structure le permettant : souvent, l'émission Cherenkov est piégée par réflexion totale interne à l'intérieur de cette structure, empêchant la lumière d'arriver au détecteur.

Récemment, des chercheurs du MIT et du CERN se sont associés pour proposer une idée innovante : utiliser la radiation émise par une particule traversant une interface entre deux milieux (radiation de transition) [1]. Si pour une seule interface, l'émission est très faible, les interférences constructives apparaissant en répétant périodiquement les couches de matériaux permettent d'avoir un signal suffisant pour la détection des particules (voir Figure 1). Problème : la structure est extrêmement dispersive, limitant son application.

Votre mémoire consistera à optimiser une structure similaire, mais non périodique. L'intuition est que le désordre rendra cette structure efficace pour mesurer la vitesses des particules : le désordre s'est déjà montré très utile pour rendre les lampes à incandescences aussi efficaces que les LED [2] ! Vous réutiliserez le développement théorique (matrices de transfert) de [1] et modifierez leur code pour le rendre efficace pour l'optimisation. Nous espérons ainsi mettre au point un détecteur de particule compact et efficace.

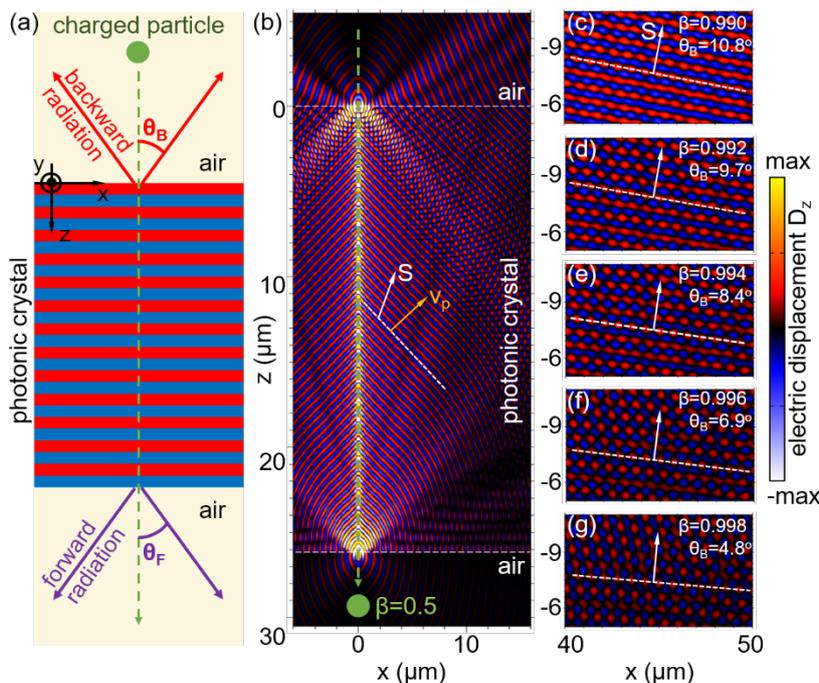


Figure 1. Contrôle des angles d'émission Cherenkov à partir d'un cristal photonique. (a) La structure étudiée. (b) Radiation émise par le passage de la particule chargée. (c)-(f) Orientation du vecteur de Poynting de la radiation pour différentes vitesses de la particule chargée ($\beta = v/c$ où v est la vitesse de la particule et c la vitesse de la lumière).

[1] Xiao Lin et al. Controlling Cherenkov angles with resonance transition radiation, *Nature Physics* 14, p. 816–821, 2018.

[2] O. Ilic et al. Tailoring high-temperature radiation and the resurrection of the incandescent source, *Nature Nanotechnology* 11, p. 320–324, 2016.

Sujet 3 : Bound state In the Continuum (BIC) : modes confinés aux propriétés étranges.

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, de 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 (pour 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 ». 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 particulier permet d'avoir des modes confinés *dans* le cône de lumière : les BIC's (Fig. 1).

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-BIC' ou 'quasi-BIC').

Le but du mémoire sera d'utiliser un logiciel électrodynamique afin de réaliser des simulations numériques permettant d'identifier des BIC's dans différentes structures. Vous apprendrez à identifier des BIC's dans des contextes photoniques variés, et à calculer leur facteur de qualité ('Q-factor'), signe de bon confinement ou non du mode dans le matériau, ainsi que d'autres propriétés de ces modes particuliers.

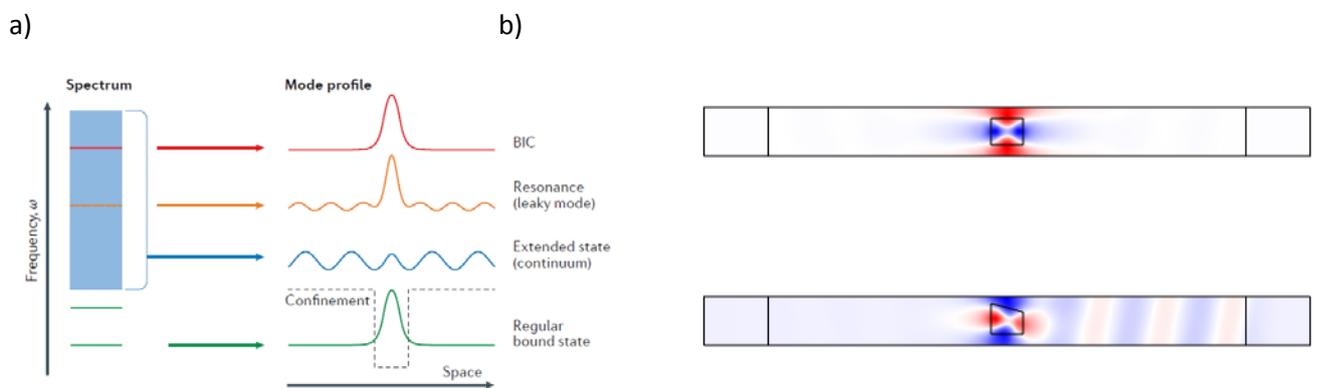


Figure 1a) : Différents types de modes possibles dans un métamatériau. 1b) Haut : Profil du champ électrique d'un BIC. Bas : Profil du champ électrique d'un UGR (Unidirectional Guided Resonance), un type particulier de BIC qui sera possiblement abordé durant le mémoire.

[1] Hsu, C., Zhen, B., Stone, A. *et al.* Bound states in the continuum. *Nat Rev Mater* **1**, 16048 (2016). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.48>

Sujet 4 : Approche analytique et numérique des cavités photoniques couplées : Application aux systèmes bistables thermiques

Un système présente une bistabilité lorsque celui-ci peut rejoindre deux états d'équilibre stables distincts à partir d'un état de départ instable. Dans ce projet, on étudiera le cas d'une bistabilité thermique. Pour un tel système, une petite fluctuation autour d'une température donnée peut le conduire à rejoindre deux états différents. Les applications de ce phénomène sont nombreuses et l'intérêt grandissant. En effet, de multiples systèmes électroniques dissipent beaucoup d'énergie et il serait donc intéressant d'utiliser la chaleur excédentaire déjà présente dans ces dispositifs. Parmi ces applications, on peut citer [1], la mémoire thermique, les redresseurs thermiques, les transistors thermiques, les portes logiques phononiques,...

Le point de départ du mémoire sera l'étude, à l'aide de simulations numériques, d'une bistabilité thermique [1]. L'idée de base est de considérer trois corps à des températures différentes (voir figure 1). Deux d'entre eux (aux extrémités) voient leur température constante. Le troisième (central) n'échange de l'énergie qu'avec les deux autres, sa température évolue donc via ces échanges thermiques. Chacun des corps est également caractérisé par une fréquence de résonance dans le domaine infrarouge. Lorsque, pour le corps central, cette fréquence dépend de la température (on parle d'effets thermo-optiques), une telle bistabilité peut se présenter.

Le but est donc d'étudier ce système à trois corps et d'analyser de nouvelles configurations. Durant le mémoire, l'étudiant combinera à la fois une approche analytique et une approche numérique. Il sera amené à utiliser des outils tels que la théorie des modes couplés [2] et les processus stochastiques [3].

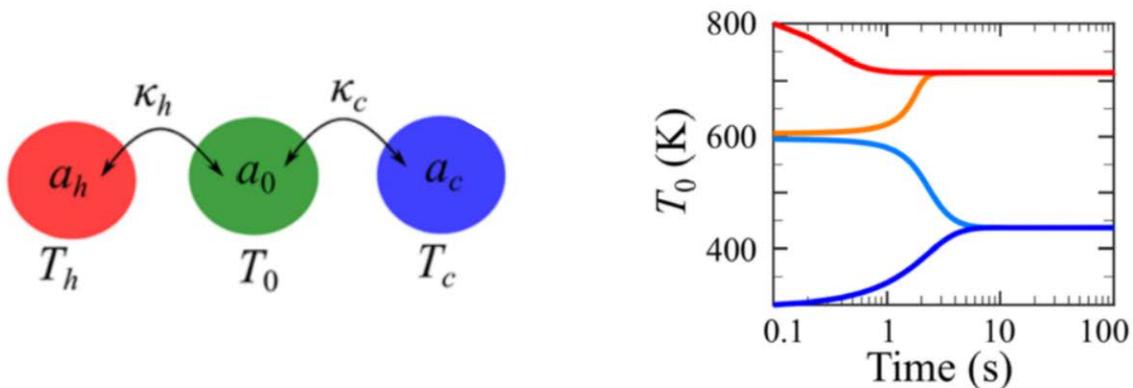


Figure 1 : (gauche) Vue schématique des trois corps à des températures différentes. (droite) Bistabilité thermique du corps central.

1. Khandekar, C., Rodriguez, A. W. Thermal bistability through coupled photonic resonances. *Appl. Phys. Lett.* 111, 083104 (2017).
2. Khandekar, C., Lin, Z. Rodriguez, A. W. Thermal radiation from optically driven Kerr ($\chi(3)$) photonic cavities. *Appl. Phys. Lett.* 106, 151109 (2015).
3. Jacobs, K. Stochastic Processes for Physicists: Understanding Noisy Systems. (Cambridge University Press, 2010).

En collaboration avec le Service de Physique biomédicale

Contacts : quoclam.vuong@umons.ac.be, gilles.rosolen@umons.ac.be

Sujet 5 : Simulation de la relaxation magnétique nucléaire induite par des nanoparticules de formes exotiques

Les nanoparticules magnétiques sont étudiées depuis de longues années dans le domaine médical : elles sont en effet utilisées comme agent de contraste pour l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) ou comme particules chauffantes en hyperthermie. Elles peuvent donc potentiellement servir d'outil théranostique : elles permettent à la fois le diagnostic (en tant qu'agents de contraste) ainsi qu'agent thérapeutique (elles peuvent délivrer des médicaments ou être chauffées sous champ magnétique).

Un des grands axes de développement de la recherche actuelle est la synthèse de nanoparticules présentant des formes géométriques différentes de la forme sphérique conventionnelle [1]. Ces particules de forme particulière, par exemple cubique ou linéaires (Figure 1), ont l'avantage de s'introduire plus facilement dans certaines cellules ou organes. Des coquilles sphériques creuses présentent aussi un intérêt : elles peuvent contenir des médicaments spécifiques à délivrer tout en jouant de rôle d'agents de contraste. Cependant, le profil du champ magnétique généré par ces particules « originales » est différent de celui créé par une particule sphérique, ce qui pourrait réduire leur efficacité comme agent de contraste pour l'IRM.

Dans le cadre de ce stage, nous vous proposons de prédire théoriquement l'efficacité de ces particules en tant qu'agents de contraste en imagerie par résonance magnétique. Plus spécifiquement, vous utiliserez le logiciel COMSOL pour prédire les champs magnétiques produits par des nanoparticules de différentes formes et écrirez un programme utilisant les données COMSOL et simulant la relaxation magnétique nucléaire induite par ces particules lorsque des molécules d'eau diffusent autour d'elles.

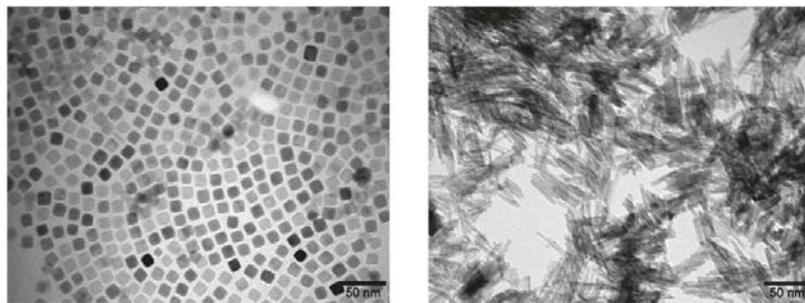


Figure 1 Microscopie électronique de de nanoparticules cubiques et linéaires

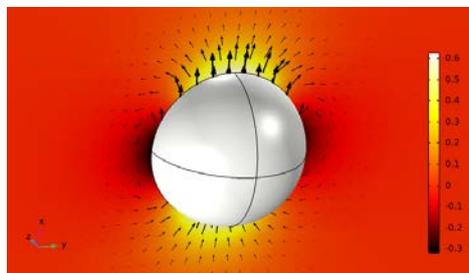


Figure 2 Champ magnétique d'une particule sphérique magnétisée généré grâce au logiciel COMSOL.

[1] Naumenko V, Garanina A, Nikitin A, Vodopyanov S, Vorobyeva N, Tsareva Y, Kunin M, Ilyasov A, Semkina A, Chekhonin V, Abakumov M and Majouga A 2018 Biodistribution and Tumors MRI Contrast Enhancement of Magnetic Nanocubes, Nanoclusters, and Nanorods in Multiple Mice Models *Contrast Media & Molecular Imaging* **2018** 1–12