



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Titre (français) : Mise en évidence expérimentale de la diffusion EM avant ou arrière d'une sphère diélectrique sub-longueur d'onde

Title (English): Experimental evidence of the forward and backward EM scattering of a single subwavelength dielectric sphere

*Jean-Michel Geffrin**, *B. Garcia-Camara***, *Redha Abdeddaim**, *R. Gomez-Medina^{3*}*, *Pablo Albella^{4*}*, *L.S. Froufe-Pérez^{5*}*, *Christelle Eyraud**, *Amélie Litman**, *Rodolphe Vaillon^{6*}*, *F. Gonzalez^{7*}*, *Manuel Nieto-Vesperinas^{8*}*, *J.J. Saenz^{3*}*, *Fernando Moreno^{7*}*

* Institut Fresnel, Campus de St Jérôme, 13013 Marseille, France

** CIN2(CSIC) and CIBER-BBN, Campus UAB, Bellaterra, 08193 Barcelona, Espagne

^{3*} Dep. de Física de la Materi, Univ. Autonoma de Madrid, Campus de Cantoblanco, 28049 Madrid, Espagne

^{4*} CSIC-UPV/EHU, Paseo Manuel de Lardizabal 5, 20018 Donostia-San Sebastian, Espagne

^{5*} Inst. de Estructura de la Materi, Serrano 121, 28006 Madrid, Espagne

^{6*} CETHIL, Insa de Lyon, F-69621 Lyon, France

^{7*} Grupo de Optica, Universidad de Cantabria, Avda. de Los Castros s/n, 39005 Santander, Espagne

^{8*} Inst. Ciencia de Material Madrid, Campus de Cantoblanco, 28049 Madrid, Espagne/Organisme de rattachement

Mots-clefs (en français et en anglais) : Analogie Microonde, Mesures de diffraction EM, Conditions de Kerker, Effets Magnétodiélectriques / Microwave analogy, EM scattering measurements, Kerker conditions, Magnetodielectric effects

Résumé

Il y a quelques décennies, il a été prévu théoriquement que des petites sphères magnéto-diélectriques présentent des caractéristiques inhabituelles de diffusion électromagnétique. Toutefois, mesurer un tel comportement est demeuré jusqu'à présent insaisissable. Dans cet article, il est expérimentalement prouvé qu'une seule sphère sub-longueur d'onde, diélectrique et à faibles pertes, d'indice de réfraction modéré ($n = 4$ comme pour certains semi-conducteurs en proche infrarouge) rayonne des champs identiques à ceux qu'émettraient des dipôles électriques et magnétiques d'égale amplitude. Ces champs sont de plus similaires à ceux rayonnés par des sphères magnéto-diélectriques idéales. Les diagrammes de diffusion mesurés et le degré de polarisation linéaire montrent que la puissance rayonnée apparente peut être dirigée vers l'avant ou principalement vers l'arrière. Ces conditions de diffusion -dites de Kerker- dépendent uniquement du ratio taille/longueur d'onde. Ces travaux ouvrent la voie à de nouveaux défis technologiques en nano et micro-photonique, pour la conception d'antennes, de métamatériaux et de dispositifs électromagnétiques innovants.

Introduction

La diffraction par des particules petites devant la longueur d'onde est une thématique qui trouve des applications dans des domaines variés comme par exemple les télécommunications ou les sciences des matériaux. Les petites antennes en sont un exemple d'actualité. Pour bon nombre d'applications, il est important de pouvoir maîtriser les caractéristiques diélectriques mais aussi magnétiques des matériaux. Il y a quelques temps déjà, Kerker [1] a montré que sous certaines contraintes de permittivité et de perméabilité, une particule soumise à une onde plane peut être assimilée à deux dipôles, l'un électrique l'autre magnétique, qui peuvent osciller soit en phase, soit en opposition de phase. Dans le premier cas, l'onde réémise est préférentiellement dirigée dans la direction de l'onde incidente, alors que dans le deuxième cas, l'onde issue de la particule se propage principalement en direction opposée à celle de l'onde excitatrice.

Tirant parti du fait que dans le domaine optique des matériaux comme le silicium ou le germanium présentent de fortes résonances magnétiques, et mettant à profit les résonances dipolaires magnétique et électrique des sphères, il nous a semblé possible d'obtenir dans le domaine du proche Infra Rouge (IR) des effets similaires à ceux prévus pour ces matériaux magnétodiélectriques hypothétiques grâce à de simples sphères diélectriques judicieusement choisies [2]. Pour démontrer expérimentalement ces phénomènes avec une sphère unique, nous avons choisi de translater notre étude

vers le domaine des microondes via un facteur d'échelle λ/na . Ceci nous a permis de passer de dimensions nanométriques à des dimensions millimétriques pour les particules et de travailler avec des longueurs d'onde centimétriques (quelques GHz). Cette technique est couramment appelée analogie microonde. Des matériaux de caractéristiques diélectriques similaires à celles des semi-conducteurs ont été trouvés ($\epsilon_r = 16$), et nous avons ainsi pu réaliser les mesures de diffraction dans la chambre anéchoïque du Centre Commun de Ressources Microondes (CCRM) à Marseille.

Nous présentons ici très brièvement l'analyse, basée sur la théorie de Mie, qui permet de comprendre l'interaction des dipôles électriques et magnétiques, puis nous nous attacherons plus finement à l'étude expérimentale qui a permis de mettre en évidence les phénomènes de diffraction avant et de diffraction arrière.

1. Bases théoriques

La théorie de Mie appliquée à des sphères sub-longueur d'onde permet de calculer l'interaction d'une onde plane avec une sphère à partir des coefficients électriques et magnétiques $\{a_n\}$ et $\{b_n\}$ qui sont proportionnels, pour les a_1 et b_1 , aux dipôles électrique et magnétiques, pour a_2 et b_2 , aux quadripôles, et ainsi de suite. Le poids des différents coefficients dépendant de la dimension a de la sphère considérée. Il a été montré que dans le proche IR, des sphères de dimension de 0,1 à 0,2 longueurs d'ondes et de permittivité modérée $\epsilon_r = 16$ pouvaient présenter des effets de diffraction magnétodiélectriques. Ceci nous a conduit à mesurer, en chambre anéchoïque, le champ diffracté par une sphère de 18 mm de diamètre usinée dans le matériau *Eccostock HIK K=16* entre 3 et 9 GHz. Cependant, vu les petites dimensions de cette sphère devant la longueur d'onde, ces mesures ont requis toute notre attention et nos compétences pour pouvoir en extraire des informations pertinentes.

2. Mesures

2.1. Principe de la mesure de diffraction

Comme pour toutes nos mesures de diffraction, le champ diffracté n'est obtenu qu'après quatre phases incontournables, cependant nous verrons par la suite l'importance des post-traitements qui ont dû y être associés vu la très petite taille de l'objet considéré. La première phase de la mesure consiste à mesurer le champ incident E_{inc} , c'est à dire le champ en absence de la sphère, la deuxième étape étant la mesure du champ en présence de la sphère, le champ total E_{tot} . Le champ diffracté est alors obtenu par soustraction complexe des deux champs précédemment mesurés (Fig. 1a). Ces deux mesures sont ensuite réalisées avec un objet de référence, ici une sphère métallique de 35 mm de diamètre, qui permet d'étalonner les champs diffractés par comparaison aux résultats de simulations réalisées à partir de la théorie de Mie.

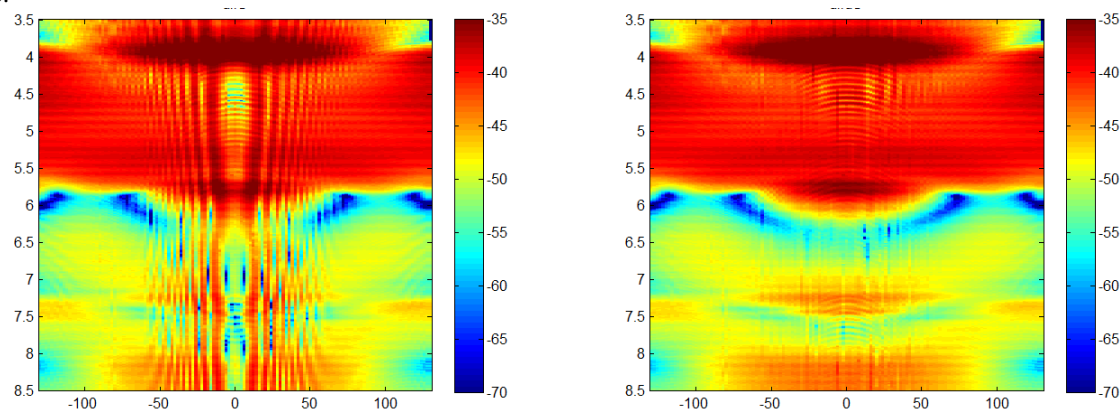


Fig. 1 : Module du champ diffracté (en dB) en fonction de la position angulaire des récepteurs (en $^{\circ}$) et de la fréquence (en GHz). Le récepteur à 0° correspond à la diffraction avant. (a) Mesures brutes (b) Mesures corrigées en dérive.

2.2. Correction de dérive

On met ici à profit l'effet de filtrage passe bas de la propagation pour affiner les résultats des mesures [3]. En effet, sans autre information *a priori* que le fait que l'objet est d'extension limitée et que notre mesure est faite à une distance supérieure à $\lambda/2$ de la cible, par détermination du coefficient complexe (d, ψ) qui minimise la bande spectrale angulaire du champ diffracté corrigé en dérive ($E_{dif} = E_{tot} - d e^{j\psi} E_{inc}$), on parvient à compenser l'effet des variations d'amplitude, qui sont de moindres conséquences, mais surtout de phase qui se produisent entre les mesures du champ incident et du champ total (Fig. 1b)

2.3. Fenêtrage temporel

On utilise ici une technique tout à fait classique en radar, de fenêtrage temporel pour éliminer les signaux issus des réflexions parasites de l'environnement de l'objet dont on cherche à mesurer le champ diffracté. Ce fenêtrage est effectué en passant d'abord du domaine fréquentiel, dans lequel sont faites nos mesures, au domaine temporel par une

transformée de Fourier puis en revenant après fenêtrage, au domaine fréquentiel par transformée de Fourier inverse (Fig. 2).

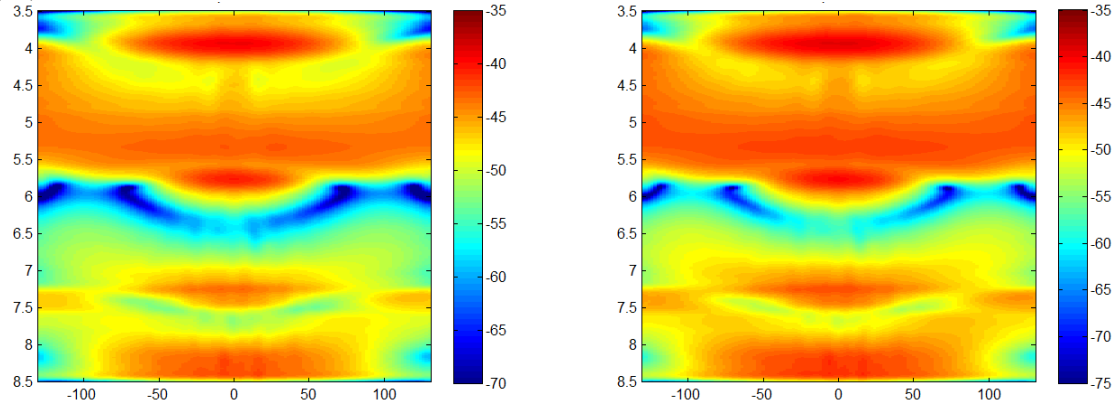


Fig. 2 : Module du champ diffracté (en dB) en fonction de la position angulaire des récepteurs (en °) et de la fréquence (en GHz). (a) Après fenêtrage temporel (b) Après filtrage passe bas.

2.4. Filtrage passe bas

On peut ensuite rajouter une 3^{ème} étape de post traitement, en profitant du fait que la dimension de l’objet est connue. En effet, on sait que le spectre angulaire de son champ diffracté sera borné (par $2ka'$ où k est le module du vecteur d’onde et a la plus grande dimension de l’objet cf. [4]). On peut donc alors mettre à profit cette connaissance pour appliquer un filtrage passe bas (ici la taille de l’objet a été surestimée d’un facteur 2 pour limiter les effets de bord du filtrage). On remarque que cette dernière correction, nécessitant une information *a priori* plus forte sur la cible, a une influence moindre sur le champ diffracté, déjà corrigé efficacement grâce aux deux premiers traitements.

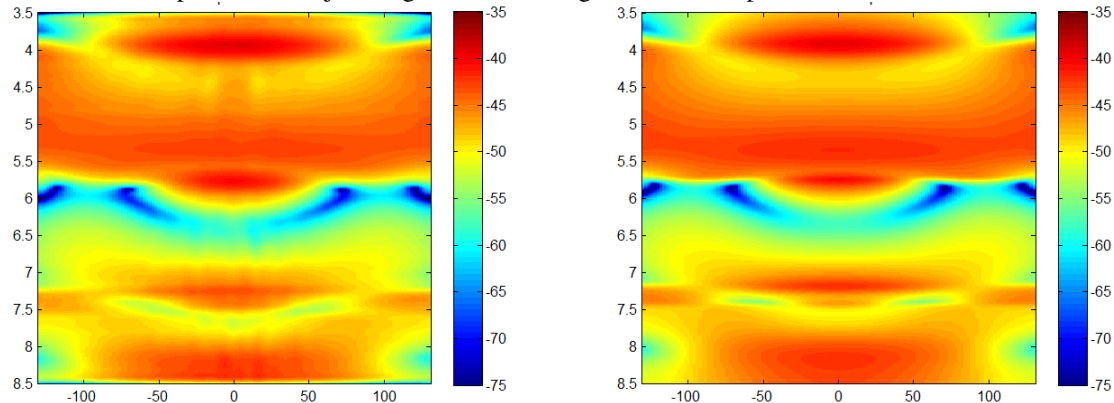


Fig. 3 : Module du champ diffracté (en dB) en fonction de la position angulaire des récepteurs (en °) et de la fréquence (en GHz) (a) Après les trois types de post-traitements précédemment mentionnés (b) Simulations de Mie.

3. Champs diffractés avant et arrière, simulations et mesures.

Comme prévu par la théorie (et par Kerker), avec une telle sphère on peut voir, qu’à certaines fréquences, le champ diffracté simulé présente bien les effets de diffraction avant (Fig. 4b) ou arrière (Fig. 4a). Ceci est validé également par nos expériences, les résultats présentés ici correspondant au cas de polarisation S, (cf. [5] pour le cas de polarisation P).

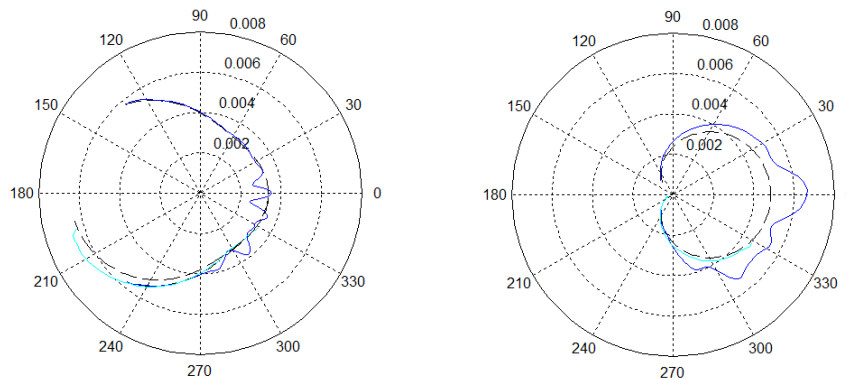


Fig. 4 : Diagramme de diffraction d’une sphère de permittivité égale à 16 et de diamètre 18 mm (a) Fréquence de 4.36 GHz (b) Fréquence de 3.57 GHz

pointillés noirs : simulations, bleu foncé : première configuration de mesure, bleu clair : deuxième configuration

4. Conclusion

Nous avons donc pu démontrer expérimentalement et sans ambiguïté qu'avec des sphères purement diélectriques de permittivité relativement peu élevée et dont le diamètre est de un à deux dixièmes de longueur d'onde dans le vide, on peut obtenir des résultats comparables à ceux prévus pour de matériaux magnétodiélectriques. Ces résultats ouvrent de nombreuses perspectives tant dans le domaine des microondes que dans celui de l'optique.

Références bibliographiques

1. Kerker, M., Wang, D.S. & Giles, L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres. *J. Opt. Soc. Am.* 73, 765–767 (1983)
2. Gomez-Medina, R et al. Electric and magnetic dipolar response of germanium nanospheres: interference effects, scattering anisotropy, and optical forces, *J. Nanophoton*, 5, 053512 (2011).
3. Eyraud, C., Geffrin, J.-M., Litman, A., Sabouroux, P., Giovannini, H., Drift correction for scattering measurements. *Appl. Phys. Lett.* 89, 244104 (2006).
4. Bucci, O. M., and Franceschetti, G., On the spatial bandwidth of scattered fields, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 35, 1445–1455 (1987).
5. Geffrin, J.- M., Garcia-Camara, B., Gomez-Medina, R., Albella, P., Froufe-Perez, L.S., Eyraud, C., Litman, A., Vaillon, R., Gonzalez, F., Nieto-Vesperinas, M., Saenz, J.J., Moreno, F., Magnetic and electric coherence in forward and backscattered electromagnetic waves by a single dielectric subwavelength sphere, *Nature Communications* 3, 1171 (2012).