

Tirer parti de la diffusion optique : de l'acquisition comprimée au traitement de l'information

Laurent Daudet^{1,2}

¹ : Institut Langevin, Univ. Paris Diderot, ESPCI, CNRS, PSL Research University,
1 rue Jussieu, 75005 Paris.

² : LightOn, 2 rue de la Bourse, 75002 Paris
laurent.daudte@espci.fr

Résumé

La diffusion multiple de lumière cohérente à travers un matériau diffusant est un processus physique extrêmement complexe, mais sa linéarité permet de la décrire en terme de matrice de transmission. On peut ainsi optiquement faire en sorte que si le faisceau entrant est modulé spatialement pour encoder certaines données, la sortie mesurée sur un capteur soit modélisée comme une projection aléatoire de l'entrée, c'est-à-dire sa multiplication par une matrice aléatoire dont les coefficients sont issus d'un processus stochastique i.i.d. complexe et Gaussien. On peut tirer parti de ce principe pour l'imagerie compressive, et plus généralement pour tout schéma de traitement de données impliquant des projections aléatoires à grande échelle. Cet exposé abordera les développements technologiques récents des co-processeurs optiques au sein de la startup LightOn et présentera une série d'expériences de preuve de concept en apprentissage statistique : apprentissage par transfert, la détection de changement dans les séries temporelles, systèmes de recommandation.

Travaux effectués en collaboration avec Igor Carron, Sylvain Gigan, Florent Krzkala, leurs équipes et les collaborateurs de LightOn.

1. Introduction : le speckle n'est pas du bruit, c'est de l'information !

Nous utilisons la diffusion multiple de la lumière cohérente à travers un milieu diffusant épais comme objet d'étude modèle pour deux problèmes duaux :

- « comment l'algorithmique aide l'optique » : une nouvelle approche d'*optique computationnelle*, où comment l'algorithmique permet d'améliorer des systèmes d'imagerie, en l'occurrence une imagerie sous-échantillonnée de type *échantillonnage compressé*.
- « comment l'optique aide l'algorithmique » : utiliser ce système comme un processeur optique (analogique) de l'information qui s'insère dans une chaîne numérique de traitement, en particulier pour accélérer certains des calculs de l'Intelligence Artificielle à très grande dimension.

2. Imagerie compressée, ou « comment l'algorithmique aide l'optique »

Le système d'imagerie compressée [1] est présenté figure 1. Après calibration de la matrice de transmission du milieu diffusant et du système optique, il est possible de reconstruire l'image d'entrée (c'est-à-dire de « voir » à travers le milieu diffusant) à partir de la mesure de l'intensité du speckle sur quelques pixels du capteur. Le nombre de pixels est dicté par le degré de parcimonie de l'image d'entrée, selon la théorie de l'acquisition compressée (*compressive sampling / compressed sensing*) jusqu'à être au plus près du contenu informationnel de l'image.

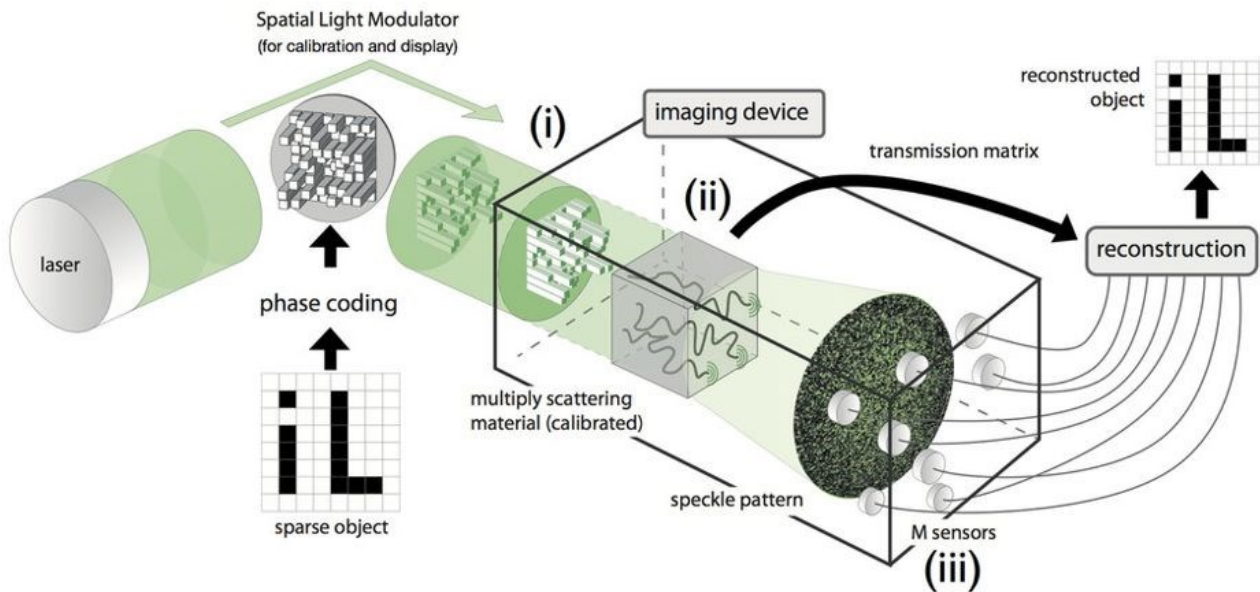


Figure 1. Système d'imagerie compressée (d'après [1])

3. Traitement optique de l'information pour le *machine learning*, ou « comment l'optique aide l'algorithmique »

On peut utiliser un dispositif expérimental similaire dans un schéma de calcul analogique de « projections aléatoires », en entrant des données numériques discrètes via le Modulateur Spatial de Lumière et en les re-convertissant en numérique au niveau du capteur d'image CMOS. Les projections aléatoires obtenues sont utiles dans un grand nombre de schémas d'apprentissage statistique (*machine learning*, à la base de la plupart des systèmes actuels d'intelligence artificielle), en utilisant les bonnes propriétés des matrices aléatoires pour la réduction ou l'expansion dimensionnelles. De façon remarquable, dans une très grande majorité de cas d'usage la calibration de la matrice de transmission n'est pas nécessaire, seules des garanties sur la distribution des coefficients et sa stabilité sont importantes. Dans le cadre de la startup LightOn (www.LightOn.ai), une série de co-processeurs appelés Optical Processing Units (OPU) ont été construits et utilisés avec succès sur ce principe pour accélérer certains calculs en grande dimension [2], comme pour l'apprentissage par transfert, la détection de changement dans les séries temporelles, ou les systèmes de recommandation.

6. Bibliographie

[1] Liutkus A., Martina D., Popoff S., Chardon G., Katz O., Lerosey G., Gigan S., Daudet L., and Carron I., Imaging With Nature: Compressive Imaging Using a Multiply Scattering Medium, *Scientific Reports* (4) 5552 (July 2014).

[2] Saade A., Caltagirone F., Carron I., Daudet L., Drémeau A., Gigan S. and Krzakala F., Random projections through multiple optical scattering : approximating kernels at the speed of light, *Proceedings of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP'2016)*, Shanghai, China (2016).

La ptychographie ou l'apport des méthodes sans lentille à la microscopie

Patrick Ferrand

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille

patrick.ferrand@fresnel.fr www.fresnel.fr/comix

Résumé

Ce papier présente les dernières avancées obtenues dans notre équipe dans le domaine de la microscopie grâce à l'utilisation de la ptychographie. Cette méthode, initialement développée dans des domaines spectraux où les lentilles de qualité sont inexistantes, montre son intérêt même aux longueurs d'ondes de l'optique, par le renouveau conceptuel qu'elle engendre. Nous illustrerons plus spécifiquement la déclinaison vectorielle de la méthode, et son apport à l'étude structurale de matériaux biominéraux.

En microscopie, en dehors du domaine très favorable de la lumière visible, la résolution des méthodes d'imagerie est fortement limitée par la faible qualité des composants optiques disponibles. En microscopie électronique comme dans le domaine des rayons X, des stratégies « sans lentilles » ont été développées, exploitant la puissance croissante des micro-ordinateurs, et la *ptychographie* a permis de battre des records de résolution (0,5 Å en microscopie électronique [1]).

La ptychographie repose sur l'acquisition de séquences de clichés de diffraction obtenus en illuminant l'objet à imager en différentes positions se chevauchant, au moyen d'un éclairage lumineux de taille finie. Des algorithmes itératifs permettent alors de reconstruire numériquement les propriétés de l'objet, sous la forme d'une carte d'amplitudes complexes [2]. Nous en avons développé une version *vectorielle*, plus générale, qui utilise des éclairages polarisés et des analyses en polarisation [3], et qui permet de reconstituer en chaque point de l'objet (i) sa matrice de Jones [4,5], ainsi que l'amplitude, le front d'onde, et l'état de polarisation des faisceaux d'illumination [6]. Utilisée dans le domaine de l'optique, non seulement la ptychographie combine les valeurs ajoutées des microscopies de phase et de polarisation, mais la richesse d'informations fournies permet d'envisager des analyses structurales sur des matériaux complexes.

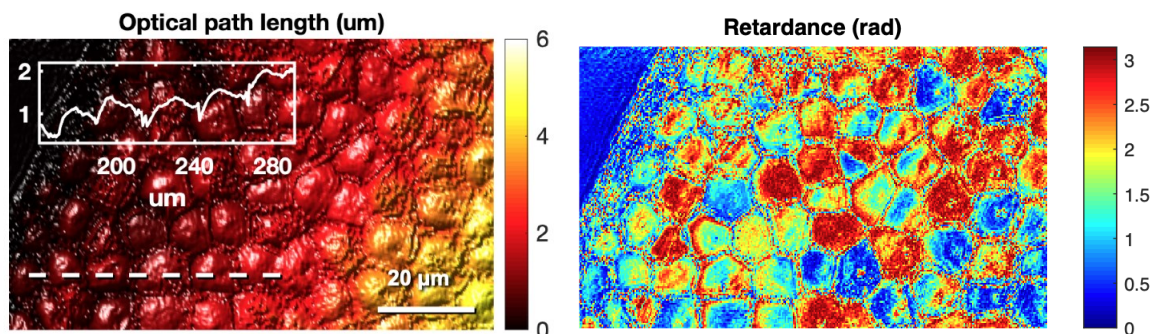


Figure 1. Bordure d'une coquille d'huitre *Pinctada margaritifera*. Chemin optique montrant la forme en dôme de chaque prisme et le gradient d'épaisseur sur la zone imagée. Retard de biréfringence permettant d'inférer l'orientation cristalline de chaque prisme. D'après [7]

C'est le cas des coquilles d'huitres, bio-assemblages de microprismes de calcite séparés par des barrières organiques, que nous étudions pour comprendre les mécanismes de biominéralisation. La

ptychographie permet de corrélérer la topographie du matériau avec ses propriétés structurales, comme les montrent les figures 1 et 2. [7]

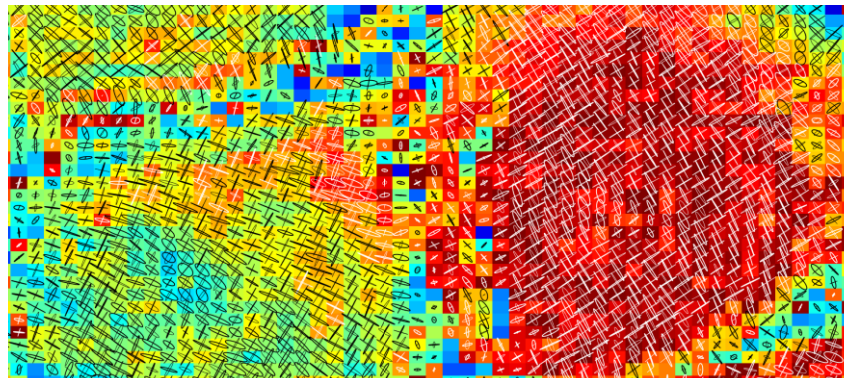


Figure 2. Détail d'une coquille d'huitre. L'échelle de couleur indique la biréfringence (même échelle de couleur que Fig. 1). Les ellipses représentent les modes propres du matériau, renseignant sur ses propriétés structurales en profondeur. Échelle de l'image $20 \times 10 \mu\text{m}^2$

Remerciements

Ce travail a reçu un financement du conseil européen de la recherche (ERC) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, sous le contrat no 784881.

Références

- [1] Y. Jiang et al., "Electron ptychography of 2D materials to deep sub-ångström resolution", *Nature Phys. Rev. Lett.* 559, 343 (2018), 10.1038/s41586-018-0298-5
- [2] H. M. Faulkner and J. M. Rodenburg, "Movable aperture lensless transmission microscopy: A novel phase retrieval algorithm", *Phys. Rev. Lett.* 93, 23903 (2004), 10.1103/PhysRevLett.93.023903
- [3] P. Ferrand, M. Allain, V. Chamard, "Ptychography in anisotropic media", *Opt. Lett.* 40, 5144 (2015), 10.1364/OL.40.005144
- [4] R. C. Jones, "A new calculus for the treatment of optical systems. I. Description and discussion of the calculus", *J. Opt. Soc. Amer.* 31, 488 (1941), 10.1364/JOSA.31.000488
- [5] P. Ferrand, A. Baroni, M. Allain, V. Chamard, "Quantitative imaging of anisotropic material properties with vectorial ptychography", *Opt. Lett.* 43, 763 (2018), 10.1364/OL.43.000763
- [6] A. Baroni, P. Li, M. Allain, V. Chamard, P. Ferrand, "Joint estimation of object and probes in vectorial ptychography", *Opt. Exp.* 27, 8143 (2019), 10.1364/OE.27.008143
- [7] J. Duboisset, P. Ferrand, A. Baroni, T. Grünwald, O. Grauby, J. Vidal-Dupiol, D. Saulnier, G. Le Moullac, M. Rosenthal, M. Burghammer, J. Nouet, C. Chevallard, A. Baronnet, V. Chamard, "Amorphous-to-crystal transition in the layer-by-layer growth of bivalve shells", soumis.

Méthode de la matrice de polarisabilité globale pour la modélisation de l'interaction lumineuse avec des nanostructures complexes résonantes

M. Bertrand¹, A. Devilez¹, J.-P. Hugonin², P. Lalanne¹, K. Vynck¹

¹ : LP2N, CNRS, IOGS, Univ. Bordeaux, 33400 Talence, France

² : LCF, CNRS, IOGS, Univ. Paris-Saclay, 91127 Palaiseau, France
kevin.vynck@institutoptique.fr

Résumé

Les ensembles désordonnés de nanoparticules résonantes dans des milieux stratifiés offrent une gamme très riche de fonctionnalités optiques issues de phénomènes cohérents à l'échelle de la nanoparticule individuelle (résonances d'ordre élevé, interaction avec une interface, ...) et à l'échelle mésoscopique d'un ensemble de nanoparticules (localisation, ...). Ici, nous présentons une méthode numérique permettant de résoudre de tels problèmes électromagnétiques multi-échelles avec exactitude et efficacité.

1. Introduction

Les ensembles désordonnés de nanoparticules résonantes déposées sur ou incorporées dans des empilements de couches minces possèdent de nombreuses propriétés optiques exotiques, telles qu'une absorption de la lumière efficace et sélective en fréquence [1], un couplage de la lumière contrôlé entre des modes de l'espace libre et des modes guidés [2] ou encore un confinement très fort de l'intensité lumineuse [3], qui peuvent être exploitées pour de nombreuses applications, allant du photovoltaïque à l'éclairage, en passant par la détection environnementale. Cette richesse de propriétés optiques provient des nanoparticules individuelles, de leur interaction avec une ou plusieurs interfaces, et de leur interaction mutuelle entre nanoparticules voisines.

Prédire quantitativement les propriétés optiques de telles surfaces nanostructurées complexes est cependant un défi de modélisation important dû à la difficulté de simuler des phénomènes cohérents à l'échelle nanométrique ainsi qu'à l'échelle de l'ensemble de nanoparticules. Ces premiers sont typiquement étudiés en utilisant des méthodes numériques dans lesquelles l'ensemble du domaine de calcul est discrétisé (FDTD, éléments finis, ...). Ces approches ne sont cependant pas adaptées à des problèmes impliquant un grand nombre de particules. Pour cela, les méthodes du type « matrice T » sont avantageuses car la propagation lumineuse entre particules est décrite via des tenseurs de Green. Celles-ci sont cependant limitées pour la description d'interactions en champ proche (entre nanoparticules ou entre une nanoparticule et une interface). Des efforts sont actuellement entrepris pour pallier cette limitation [4].

2. Méthode de la matrice de polarisabilité globale

La méthode que nous présentons ici permet de résoudre le problème de diffusion multiple par des structures composées d'un grand nombre de particules dans un milieu stratifié avec efficacité et en prenant en compte les interactions fortes en champ proche. La méthode s'inspire de travaux montrant qu'il est possible reconstruire le champ proche électromagnétique émis par des composants électroniques grâce à un ensemble de sources dipolaires électriques et magnétiques [5]. Nous proposons ici de trouver un petit ensemble de dipôles électriques et magnétiques permettant de reproduire le champ proche diffusé par une nanoparticule arbitraire pour une excitation arbitraire (placée dans le champ proche ou dans le champ lointain). Un problème inverse est résolu numériquement pour calculer une matrice de polarisabilité globale de l'ensemble

de dipôles, conceptuellement équivalent à l'opérateur de transition de la particule. Cela permet ensuite de traiter des problèmes de diffusion multiple y compris lorsque les nanoparticules sont très proches les unes des autres et/ou proches d'interfaces [6].

3. Résultats

La figure 1 illustre la capacité de la méthode de la matrice de polarisabilité globale à prédire quantitativement le champ produit par une nanostructure composée de plusieurs nanoparticules interagissant en champ proche. Nous comparons ici nos prédictions pour 20 cylindres fortement résonants (Silicium, 500 nm de longueur, 100 nm de diamètre) avec les résultats obtenus par un logiciel commercial d'éléments finis (COMSOL Multiphysics). Le calcul d'éléments finis a été poussé à ses limites computationnelles (pour une utilisation sur une station de travail classique, 64 Go de RAM). Notre méthode nous permet de traiter des systèmes composés de plus de quelques centaines de particules, couvrant ainsi une surface très grande.

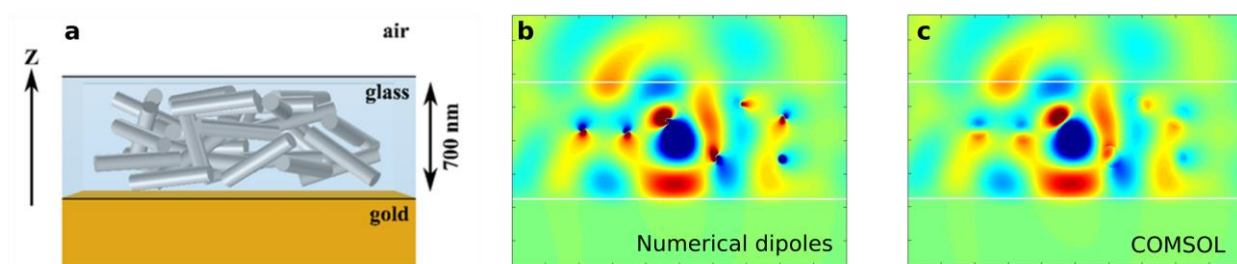


Figure 1. Modélisation de la diffusion multiple avec la méthode de la matrice de polarisabilité globale. (a) La nanostructure consiste en un ensemble dense de 20 cylindres de silicium fortement résonants, placés dans une couche de verre sur un substrat d'or. (b)-(c) Cartes du champ électrique produit par une source dipolaire placée au centre de la nanostructure, tel que prédit par notre méthode (b) et par un logiciel d'éléments finis (c). L'accord est excellent en tout point de l'espace à l'extérieur des cylindres (tel qu'attendu).

4. Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'IdEx Bordeaux LAPHIA (ANR-10-IDEX-03-02) via le projet X-STACKS, ainsi que par l'Agence Nationale de la Recherche via le projet NanoMiX (ANR-16-CE30-0008).

5. Bibliographie

- [1] Moreau A *et al.*, Controlled-reflectance surfaces with thin-film coupled colloidal nanoantennas, *Nature*, vol. 492, pp. 86-89, 2012
- [2] Jouanin A, Hugonin J-P and Lalanne P, Designer colloidal layers of disordered plasmonic nanoparticles for light extraction, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 26, pp.6215-6223, 2016
- [3] Conley GM, Burresi M, Pratesi F, Vynck K and Wiersma DS, Light transport and localization in two-dimensional correlated disorder, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, pp. 143901, 2014
- [4] Egel A *et al.*, Extending the applicability of the T-matrix method to light scattering by flat particles on a substrate via truncation of Sommerfeld integrals, *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, vol. 202, pp. 279-285, 2017
- [5] Beghou L, Liu B, Pichon L and Costa F, Synthesis of equivalent 3-D models from near field measurements – Application to the EMC of power printed circuit boards, *IEEE Trans. Mag.*, vol. 45, pp. 1650-1653, 2009
- [6] Bertrand M, Devilez A, Hugonin J-P, Lalanne P and Vynck K, arXiv:1907.12823.