

Proposition d'un sujet de thèse de doctorat

Sujet: **Localisation d'Anderson de la lumière**
Laboratoire: [Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés \(LPMMC UGA/CNRS\)](#)
Encadrants: [Sergey Skipetrov](#)
Contact: <http://lpmmc.cnrs.fr/skipetrov> (+33) 4 76 88 74 97

Il est facile de se convaincre que l'hétérogénéité d'un milieu perturbe la propagation d'une onde lumineuse. Des gouttelettes d'eau suspendues dans l'air et formant un brouillard diffusent les rayons lumineux et nous empêche de voir à travers, la diffusion de la lumière par des gouttelettes de gras donnent une couleur blanche à un verre de lait qui devient complètement opaque, et même la couleur bleue du ciel est due à la diffusion des rayons du soleil par les molécules d'air. Les milieux diffusant nous entourant dans la vie de tous les jours – le brouillard, le lait et l'atmosphère terrestre dans ces exemples – sont en fait des milieux faiblement diffusant car une analyse mathématique rigoureuse et expériences poussées démontrent qu'ils ne bloquent pas la propagation de la lumière mais lui confèrent un caractère d'une marche aléatoire au lieu d'une propagation rectiligne en absence de diffusion. Un phénomène beaucoup moins évident a été découvert par Philip Anderson il y a maintenant plus de 60 ans : une hétérogénéité très forte et aléatoire d'un milieu peut le rendre véritablement opaque pour une onde dû aux interférences destructives entre les ondes diffusées [1]. Ce blocage de propagation connu depuis sous le nom de « localisation d'Anderson » est universel et se réalise pour tout type d'excitation ondulatoire en présence des fluctuations aléatoires des propriétés du milieu de propagation : les « ondes de Schrödinger » décrivant les électrons dans les solides à basse température, les ondes de matière dans les nuages d'atomes froids, le son, et même, peut-être, les ondes gravitationnelles [2]. Très étrangement pourtant, la lumière résiste aux efforts de la faire « localiser », en particulier en trois dimensions (3D), et trouve toujours une voie pour continuer sa marche aléatoire à travers un milieu même très fortement diffusant [3,4].

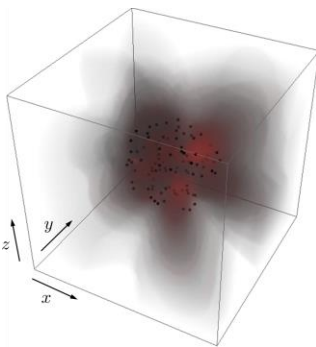


Figure : Illustration de la propagation de la lumière dans un milieu désordonné représenté par un ensemble d'atomes à deux niveaux (points noirs). L'intensité de la lumière fluctue beaucoup d'un endroit à l'autre et présente des taches « chauds » (représentés en rouge) et « froids » (représentés en noir).

Les efforts théoriques récents semblent élucider la difficulté empêchant la localisation d'Anderson de lumière en 3D [5,6]. Elle provient de la nature vectorielle de la lumière et de l'existence des ondes lumineuses longitudinales qui ne sont possibles que dans un milieu hétérogène. Paradoxalement, l'hétérogénéité du milieu de propagation, nécessaire pour diffuser la lumière, est également à l'origine d'un nouveau canal de transport optique impliquant les ondes longitudinales et empêchant le blocage de propagation même lorsque l'hétérogénéité est très forte. La réalisation de ce fait nous a permis de proposer un milieu désordonné dans lequel les ondes longitudinales sont découplées des ondes transverses et ne contribuent pas au transport d'énergie lumineuse : un ensemble dense de sphères conductrices [7]. La solution numérique des équations de Maxwell dans ce milieu montre la localisation d'Anderson de la lumière. Toutefois, la compréhension complète de ses mécanismes précis nous manque actuellement.

Le but de cette **thèse théorique** est d'éclaircir et de comprendre le mécanisme de localisation d'Anderson de la lumière dans un ensemble dense de sphères conductrices. Plusieurs approches théoriques et numériques seront utilisées pour atteindre ce but. D'abord, la diffusion sera traitée en termes de multipôles électromagnétiques ponctuels. Ensuite, la théorie de percolation quantique sera généralisée pour inclure la polarisation de la lumière. Et finalement, la théorie auto cohérente de localisation sera étendue pour prendre en compte à la fois la nature des diffuseurs (sphères diélectriques versus métalliques) et la polarisation de la lumière.

Le candidat devrait avoir un goût pour la physique théorique, des compétences en calcul analytique, et un minimum d'expérience en calcul numérique.

Bibliographie

1. D. Delande *et al.*, [La localisation forte d'Anderson](#), *Images de la Physique 2009*, pp. 70-74
2. A. Lagendijk, B.A. van Tiggelen and D.S. Wiersma, [Fifty years of Anderson localization](#), *Physics Today* **62**(8), 24 (2009)
3. S.E. Skipetrov and J.H. Page, [Perspectives: Red light for Anderson localization](#), *New J. Phys.* **18**, 021001 (2016)
4. S.E. Skipetrov, [Localisation d'Anderson de la lumière](#), *Photoniques* **108**, 24 (2021)
5. S.E. Skipetrov and I.M. Sokolov, [Absence of Anderson Localization of Light in a Random Ensemble of Point Scatterers](#), *Phys. Rev. Lett.* **112**, 023905 (2014)
6. B.A. van Tiggelen and S.E. Skipetrov, [Longitudinal modes in diffusion and localization of light](#), *Phys. Rev. B* **103**, 174204 (2021)
7. A. Yamilov, S.E. Skipetrov, T.W. Hughes, M. Minkov, Z. Yu, H. Cao, [Anderson localization of electromagnetic waves in three dimensions](#), arXiv:2203.02842

PhD thesis proposal

Subject: Anderson localization of light
Laboratory: [Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés \(LPMMC UGA/CNRS\)](#)
Thesis director: [Sergey Skipetrov](#)
Contact: <http://lpmmc.cnrs.fr/skipetrov> (+33) 4 76 88 74 97

It is easy to convince oneself that the heterogeneity of a medium disturbs the propagation of light. Water droplets suspended in the air and forming a fog scatter light rays and prevent us from seeing through, the scattering of light by droplets of fat give the white color to a glass of milk which becomes completely opaque, and even the blue color of the sky is due to the scattering of sunlight by air molecules. The scattering media surrounding us in everyday life – fog, milk and the Earth’s atmosphere in these examples – are, in fact, weakly scattering because rigorous mathematical analysis and extensive experiments show that they do not block the propagation of light but give it the character of a random walk instead of a rectilinear propagation in the absence of scattering. A much less obvious phenomenon was discovered by Philip Anderson more than 60 years ago: a very strong and random heterogeneity of a medium can make it truly opaque for a wave due to destructive interferences between scattered waves [1]. This halt of propagation known under the name of “Anderson localization” is universal and occurs for any type of wave excitation in the presence of random fluctuations in the properties of the propagation medium: the “Schrödinger waves” describing electrons in solids at low temperatures, matter waves in clouds of cold atoms, sound, and even, perhaps, gravitational waves [2]. Very strangely, however, light resists efforts to “localize” it, particularly in three dimensions (3D), and always finds a way to continue its random walk through even a very strongly scattering medium [3,4].

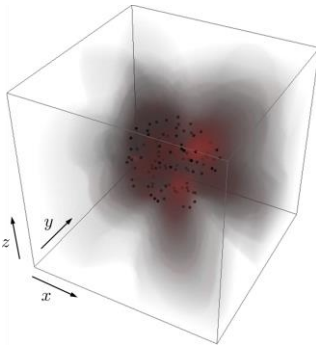


Figure: Illustration of the propagation of light in a disordered medium represented by a set of two-level atoms (black dots). The intensity of light fluctuates a lot from point to point and exhibits “hot” (shown in red) and “cold” (shown in black) spots.

Recent theoretical efforts seem to elucidate the difficulty preventing Anderson localization of light in 3D [5,6]. It arises from the vectorial nature of light and from the existence of longitudinal light waves which are only possible in a heterogeneous medium. Paradoxically, the heterogeneity of the propagation medium, necessary to scatter light, is also at the origin of a new optical transport channel involving the longitudinal waves and preventing the halt of propagation even when the heterogeneity is very strong. The realization of this fact allowed us to propose a disordered medium in which the longitudinal waves are decoupled from the transverse waves and do not contribute to the transport of optical energy: a dense set of conductive spheres [7]. The numerical solution of Maxwell’s equations in this medium exhibits Anderson localization of light. However, the complete understanding of its precise mechanisms is currently lacking.

The aim of this **theoretical thesis** is to elucidate and understand the mechanism of Anderson localization of light in a dense set of conducting spheres. Several theoretical and numerical approaches will be used to achieve this goal. First, scattering will be treated in terms of point electromagnetic multipoles. Next, the quantum percolation theory will be generalized to include the polarization of light. And finally, the self-consistent theory of localization will be extended to consider both the nature of the scatterers (dielectric versus metallic spheres) and the polarization of light.

The candidate should have a taste for theoretical physics, analytical calculation skills, and a minimum of experience in numerical calculations.

Bibliography

1. D. Delande *et al.*, [La localisation forte d’Anderson](#), *Images de la Physique 2009*, pp. 70-74
2. A. Lagendijk, B.A. van Tiggelen and D.S. Wiersma, [Fifty years of Anderson localization](#), *Physics Today* **62**(8), 24 (2009)
3. S.E. Skipetrov and J.H. Page, [Perspectives: Red light for Anderson localization](#), *New J. Phys.* **18**, 021001 (2016)
4. S.E. Skipetrov, [Localisation d’Anderson de la lumière](#), *Photoniques* **108**, 24 (2021)
5. S.E. Skipetrov and I.M. Sokolov, [Absence of Anderson Localization of Light in a Random Ensemble of Point Scatterers](#), *Phys. Rev. Lett.* **112**, 023905 (2014)
6. B.A. van Tiggelen and S.E. Skipetrov, [Longitudinal modes in diffusion and localization of light](#), *Phys. Rev. B* **103**, 174204 (2021)
7. A. Yamilov, S.E. Skipetrov, T.W. Hughes, M. Minkov, Z. Yu, H. Cao, [Anderson localization of electromagnetic waves in three dimensions](#), arXiv:2203.02842