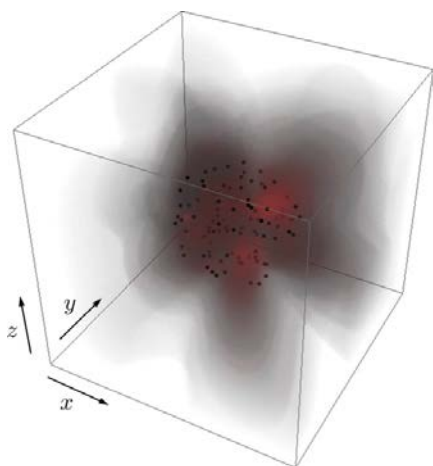


LOCALISATION D'ANDERSON DE LA LUMIÈRE

Sergey SKIPETROV¹

¹Université Grenoble Alpes, CNRS, LPMMC, 38000 Grenoble, France

*Sergey.Skipetrov@lpmmc.cnrs.fr



Un tas de poussière capable de capturer la lumière plus efficacement qu'une cavité Fabry-Perot finement réglée ? Un laser qui n'a pas besoin de réglage et dont la structure est aléatoire ? Tout cela peut devenir possible grâce au phénomène découvert par Philip Anderson il y a plus de 60 ans. Les idées apparues en physique du solide sont aujourd'hui exploitées par les opticiens qui essaient de tirer profit de la nature aléatoire de nombreux matériaux.

<https://doi.org/10.1051/photon/202110824>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

LOCALISATION D'ANDERSON COMME PHÉNOMÈNE D'INTERFÉRENCE

La localisation d'Anderson est un phénomène d'interférence menant à un arrêt de propagation d'une onde à travers un milieu désordonné. L'article original d'Anderson considérait le problème de conductivité électrique d'un matériau désordonné refroidi à basse température (voir encart) dans un modèle où un électron pouvait « sauter » d'un site à l'autre avec une certaine probabilité, et où les énergies associées aux sites étaient aléatoires [1]. L'observation de la localisation d'Anderson dans les conducteurs électriques demande de travailler avec de petits échantillons refroidis à basse température pour s'assurer que les effets d'interférence quantique se manifestent. Et

même dans ces conditions, la localisation est perturbée par les interactions entre les électrons et entre les électrons et les phonons. Cela rend difficile l'étude expérimentale du phénomène dans sa forme « pure ».

LOCALISATION D'ANDERSON DES ONDES CLASSIQUES

En réalisant l'analogie entre l'équation de Schrödinger pour un électron et l'équation d'onde, les physiciens ont proposé de chercher la localisation d'Anderson pour la lumière, les micro-ondes, le son et autres ondes « classiques » [2]. Travailler avec les ondes semblait bien pratique : les sources cohérentes — des haut-parleurs acoustiques, des antennes micro-ondes ou encore des lasers optiques — étaient disponibles à température ambiante, les interférences

pouvaient être observables à grande échelle limitées essentiellement par la longueur de cohérence de la source d'onde (jusqu'à quelques mètres pour la lumière), et le régime linéaire de propagation sans aucune interaction notable entre les ondes facilement réalisable. Toutefois, plusieurs difficultés supplémentaires sont apparues rapidement. Tout d'abord, un désordre fort s'est trouvé difficile à réaliser. Pour la lumière en particulier, le désordre résulte des fluctuations de l'indice de réfraction n , or ce dernier est limité entre 1 et ~ 4 pour les matériaux connus. Il est donc impossible de fabriquer un matériau où n varie plus de quatre fois d'un point à l'autre. Ensuite, la diffusion des ondes est résonnante : une diffusion forte ne peut avoir lieu que si l'échelle des variations spatiales de n est de l'ordre

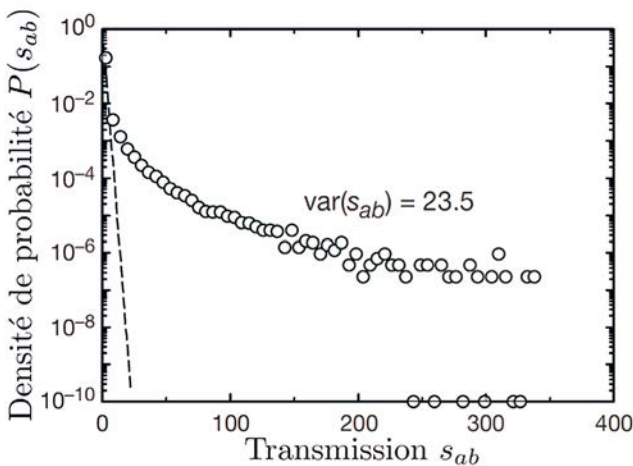
de la longueur d'onde λ . Et finalement, les ondes ont la particularité d'être absorbées par le milieu et une simple mesure de transmission d'une onde à travers un milieu ne suffit pas pour conclure sur la présence ou pas du phénomène de localisation d'Anderson car un faible signal peut être dû aussi bien à la localisation qu'à l'absorption.

LOCALISATION D'ANDERSON DE LA LUMIÈRE EN BASSES DIMENSIONS

Les difficultés décrites ci-dessus ont demandé du temps pour être contournées. La première mesure non ambiguë de la localisation des ondes électromagnétiques (fréquence ~ 10 GHz) a été réalisée par le groupe de A. Genack en 2000 [3]. L'idée était de restreindre la propagation des ondes dans deux directions spatiales en plaçant le milieu désordonné composé de sphères d'alumina (~ 1 cm de diamètre) dans un guide d'onde, et de laisser le désordre faire le travail dans la troisième direction parallèle à l'axe du guide d'onde. La localisation a été mise en évidence par les fluctuations de l'intensité transmise qui devenaient particulièrement grandes (Fig. 1).

Une plateforme très élégante permettant d'observer la localisation d'Anderson à deux dimensions (2D) a été réalisée par le groupe de M. Segev en 2007 [4]. Les chercheurs ont gravé un réseau de guides optiques parfaitement parallèles dans un cristal photo-réfractif. La propagation d'un faisceau lumineux le long de ce réseau est décrite par une équation parabolique de l'optique paraxiale. Cette dernière équation est équivalente à l'équation de Shrödinger 2D où la troisième dimension z joue le rôle du temps $t = z/c$ avec c la vitesse de lumière. Suivre l'évolution du profil du faisceau avec z permet d'observer sa localisation dans le plan transverse lorsque les guides sont positionnés au hasard (Fig. 2).

Figure 1. Distribution statistique de l'intensité transmise à travers un guide d'onde désordonné dans le régime de localisation d'Anderson (cercles). La distribution présente une « queue » prononcée par rapport à la distribution de Rayleigh attendue dans le régime de diffusion (ligne en pointillé). Sa variance $\text{var}(s_{ab})$ est également bien supérieure à la valeur de 1 pour la distribution de Rayleigh. Figure reproduite de [3] avec permission.

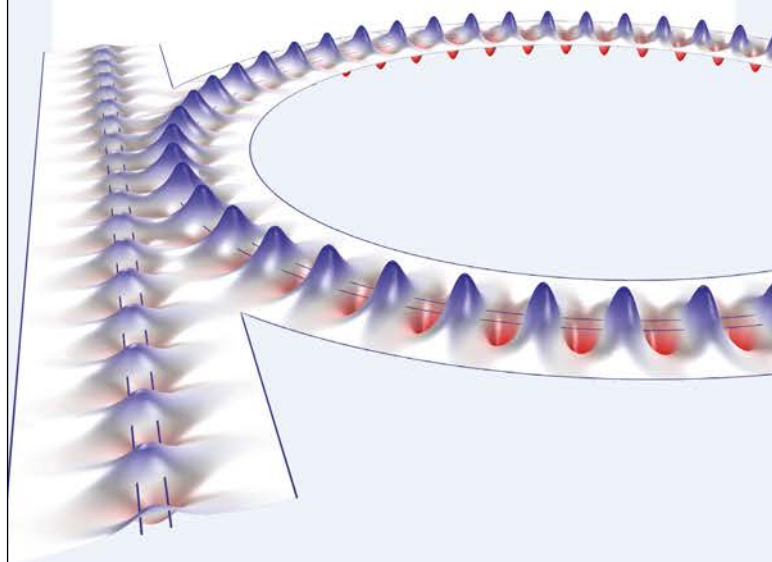


ÉTUDE DE CAS

Tout a commencé avec deux seaux d'eau...

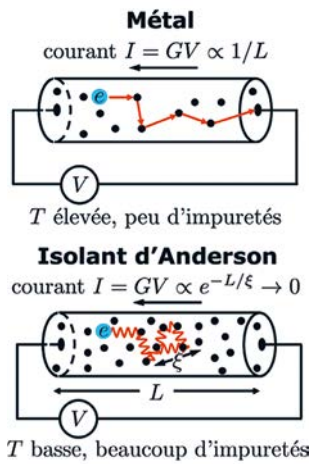
En 1870, un scientifique du nom de John Tyndall a essayé de contrôler la lumière en utilisant deux seaux d'eau, illustrant la réflexion interne totale à un public fasciné. Aujourd'hui, les chercheurs disposent d'outils plus avancés. Lorsqu'ils fabriquent et analysent des prototypes de guides d'ondes optiques, les ingénieurs actuels utilisent des logiciels de simulation numérique pour accélérer le processus de conception.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/silicon-photonics



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.

LOCALISATION D'ANDERSON EN PHYSIQUE DU SOLIDE



À température ambiante, les électrons ayant une énergie proche de l'énergie de Fermi diffusent à travers un métal ou un semi-conducteur comme des particules classiques. Ils sont déviés des trajectoires rectilignes par la diffusion sur des défauts du réseau cristallin (les « impuretés ») symbolisés par des points noirs sur l'illustration. Cette diffusion est à l'origine de la résistance électrique $R = 1/G$ et de la loi d'Ohm établissant la proportionnalité entre la tension électrique V et le courant électrique I .

À basse température, les électrons commencent à manifester des propriétés quantiques et se comportent plus comme des ondes que des particules. Les effets d'interférence entrent en jeu et affectent la conductance G d'un échantillon. Si la diffusion est suffisamment forte, les interférences peuvent devenir destructives et empêcher toute propagation en confinant l'électron dans une région spatiale de taille ξ appelée la longueur de localisation. Le matériau devient alors un isolant électrique et ne conduit plus l'électricité. Ce phénomène est appelé la « localisation d'Anderson » en honneur de Philip Anderson qui l'a découvert en 1958 [1].

LOCALISATION D'ANDERSON DE LA LUMIÈRE EN TROIS DIMENSIONS

Même si les expériences décrites ci-dessus ont permis d'étudier et de comprendre une grande partie de la physique du phénomène de localisation d'Anderson, le vrai « Graal » de ce domaine de recherche reste toujours l'observation de localisation en trois dimensions (3D) sans profiter d'un confinement supplémentaire dû à la réduction de la dimensionnalité réelle ou effective d'espace. Les premiers résultats expérimentaux datant d'il y a presque 25 ans et concernant la transmission d'une onde monochromatique à travers une poudre très diffusante composée d'un matériau semi-conducteur (GaAs) se sont avérés difficile à interpréter à cause de l'absorption non négligeable de la lumière dans la poudre. Ce problème a été contourné dans des travaux plus récents s'intéressant à des quantités

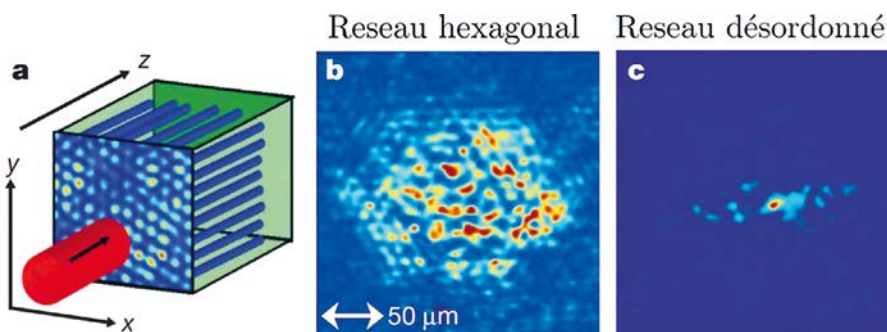
insensibles à l'absorption — la dynamique et l'étalement spatial d'une courte impulsion focalisée transmise par le milieu (Fig. 3a). Toutefois, cette approche demande d'effectuer les mesures longtemps après le temps d'arrivée du maximum de l'impulsion transmise t_{max} et elle est donc très perturbée par tout processus qui peut donner lieu à un signal optique retardé, même si ce dernier est faible. La fluorescence a été identifiée comme une source possible d'un tel signal en rendant ambiguë l'interprétation des mesures. On peut donc constater qu'à

ce jour, il n'existe pas d'observation incontestable de la localisation de la lumière en 3D par le désordre.

Au-delà des difficultés à distinguer les signatures mesurables de la localisation de celles des autres phénomènes physiques (absorption, fluorescence), une raison plus fondamentale peut être à l'origine des problèmes avec l'observation de la localisation de la lumière en 3D. Les équations de Maxwell permettent l'existence des ondes électromagnétiques longitudinales, $\text{div} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \neq 0$, dans un milieu hétérogène puisque $\text{div}[\epsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})] = 0$, où $\epsilon(\mathbf{r})$ est la permittivité. En basse dimension, le rôle des ondes longitudinales peut être réduit soit en travaillant à faible désordre comme dans l'expérience de Fig. 1, soit en restreignant la considération aux polarisations transverses que la diffusion ne couple pas aux ondes longitudinales, comme dans le cas de Fig. 2.

Mais en 3D, un désordre faible ne permet pas d'atteindre la localisation et la diffusion mélange toutes les polarisations. L'étude de la diffusion de la lumière dans les ensembles de diffuseurs ponctuels résonnants (atomes) a montré que les ondes longitudinales ouvrent un nouveau canal de transport optique qui empêche la localisation d'Anderson de la lumière [5]. Il reste à comprendre si cette conclusion reste vraie pour les milieux désordonnés plus complexes également.

Figure 2. a. Schéma de l'expérience de localisation transverse de la lumière. Un faisceau laser collimaté (cylindre rouge, 10,5 μm de largeur) se propage dans un réseau de guides d'onde parallèles à sa direction de propagation (cylindres bleus). L'étalement du faisceau après 10 mm de propagation dans un réseau périodique (b) ou désordonné (c) de guides. Figure reproduite de [4] avec permission.



EXPÉRIENCE MARQUANTE

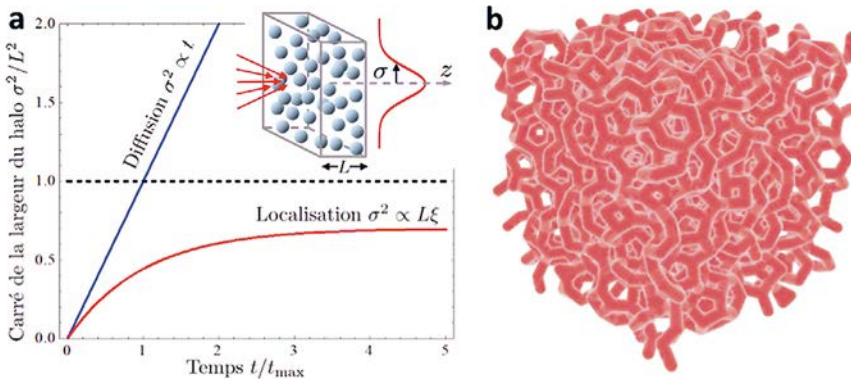


Figure 3. a. Le schéma de l'expérience dans laquelle une courte impulsion est focalisée sur une tranche de milieu désordonné et la largeur σ du halo diffusif est mesurée en transmission. L'évolution de σ^2 au cours du temps est indépendante de l'absorption et très différente pour les ondes diffuses et localisées. b. Une structure diélectrique hyper-uniforme simulée dans [6] pour mettre en évidence la localisation de la lumière. Figure adaptée de [6].

Il semble donc que la localisation d'Anderson de la lumière est très difficile, voire impossible d'atteindre en 3D sans assistance d'un autre mécanisme de confinement indépendant du désordre. Un tel mécanisme peut être dû à un confinement spatial de l'onde lumineuse par un guide d'onde ou à un confinement en espace réciproque qui se produit dans les cristaux photoniques à bandes interdites [2]. Les simulations numériques suggèrent que des structures dites « hyper-uniformes » peuvent également aider à localiser la lumière par un mécanisme similaire à celui à l'œuvre dans les cristaux photoniques (Fig. 3b) [6].

CONCLUSION

Les expériences optiques ont permis de mieux comprendre le phénomène de localisation d'Anderson proposé d'abord comme mécanisme de la transition

métal-isolant dans les conducteurs électriques. Elles ont également stimulé les recherches sur la diffusion multiple de la lumière et d'autres ondes classiques dans les milieux fortement désordonnés, menant à d'importantes avancées dans les domaines d'imagerie médicale et industrielle, des télécommunications et de l'optoélectronique, les avancées qui n'ont pas été discutées ici. Toutefois, l'ultime expérience marquante de ce domaine de recherche — l'observation non ambiguë de la localisation de la lumière par le désordre en 3D — reste à venir. Non seulement elle permettrait d'étudier ce phénomène sans être gêné par les interactions et les effets de température finie, mais elle ouvrirait également de nouvelles perspectives pour le stockage, la manipulation et la conversion de photons avec des applications inédites dans les domaines de l'information quantique et de l'énergie solaire. ●

RÉFÉRENCES

- [1] P.W. Anderson, *Phys. Rev.* **109**, 1492 (1958)
- [2] S. John, *Phys. Today* **44**(5), 32 (1991)
- [3] A.A. Chabanov, M. Stoytchev, A.Z. Genack, *Nature* **404**, 850 (2000)
- [4] T. Schwartz, G. Bartal, S. Fishman, M. Segev, *Nature* **446**, 52 (2007)
- [5] S.E. Skipetrov, I.M. Sokolov, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 03905 (2014)
- [6] J. Haberko, L.S. Froufe-Pérez, F. Scheffold, *Nature Comm.* **11**, 4867 (2020)

The Swiss Army Knife of SWIR Optics

Light-sources and optical surfaces characterization / SWIR telecoms / Alignment of complex systems, etc.

HASO
SWIR

Wavefront sensor for 0.9-1.7 μ m



HASO
R.FLEX2
SWIR

Single & double-pass characterization



R.FLEX2
LARGE APERTURE
SWIR

30-150 mm optical surfaces characterization



sales@imagine-optic.com
+33 1 64 86 15 60



www.imagine-optic.com

imagine  **optic**