

Proposition d'un sujet de thèse

Sujet : Diffusion inélastique de la lumière par des ensembles d'atomes froids
Laboratoire : Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés (LPMMC)
Directeur de thèse : Sergey Skipetrov
Contact : <http://lpmmc.cnrs.fr/skipetrov>, Sergey.Skipetrov@lpmmc.cnrs.fr, (+33) 4 76 88 74 97

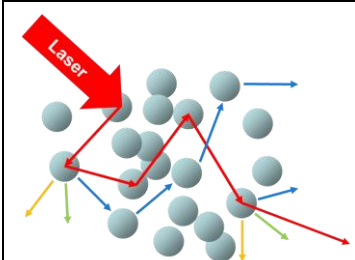


Figure. Représentation schématique d'une expérience dans laquelle un faisceau laser puissant (flèche rouge épaisse) est incident sur un ensemble d'atomes froids (billes bleues). La lumière incidente est diffusée par les atomes de manières élastique (flèches rouges fines) et inélastique (c'est-à-dire avec un changement de fréquence, flèches de couleurs différentes). On mesure généralement le spectre de puissance de la lumière diffusée, son évolution temporelle (dynamique) ou l'état quantique des photons diffusés.

Contexte : Les ensembles d'atomes froids sont des systèmes quantiques bien maîtrisés, d'une importance croissante pour diverses applications allant de la génération de lumière (lasers) à la métrologie et à l'informatique quantique [1,2]. Les expériences dans lesquelles de tels ensembles sont préparés, contrôlés et sondés par un rayonnement optique (lumière) sont aujourd'hui réalisées de manière routinière dans le monde entier [3,4]. Pourtant, la compréhension théorique de l'interaction lumière-atome dans le régime de diffusion multiple (c'est-à-dire pour des ensembles atomiques denses) reste incomplète. Alors que même la diffusion élastique (c'est-à-dire linéaire) d'un seul photon par un grand ensemble atomique continue de réserver des surprises [5], le véritable défi est posé par la diffusion inélastique collective (non linéaire) d'un grand nombre de photons — un processus dans lequel les atomes permettent aux photons d'échanger énergie et moments, conduisant à la génération de nouvelles composantes dans le spectre du rayonnement diffusé [6,7]. Une compréhension limitée de la diffusion inélastique et des phénomènes optiques non linéaires associés freine les progrès dans l'utilisation des systèmes d'atomes froids comme éléments de dispositifs optiques utiles.

Le projet : L'objectif de ce projet théorique est d'étudier plusieurs phénomènes d'importance pratique pour lesquels la diffusion inélastique joue un rôle crucial :

- *Laser aléatoire.* La rétroaction fournie par la diffusion multiple peut conduire à une émission cohérente de lumière même en l'absence de cavité. Comme dans un laser standard avec cavité, les propriétés du rayonnement émis sont contrôlées par la non-linéarité du système, qui reste mal comprise [8].

- *Instabilité optique.* Un milieu non linéaire désordonné interagissant avec la lumière peut devenir dynamiquement instable et générer un signal chaotique pour une excitation stationnaire et continue [9]. L'observabilité de ce phénomène avec des atomes froids reste une question ouverte.

- *Génération de lumière non classique.* Les photons diffusés de manière inélastique peuvent se trouver dans des états quantiques non triviaux (comprimés, intriqués, etc.), même lorsque la lumière incidente est classique (lumière laser standard) [10]. Nous prévoyons d'étendre la théorie existante pour un atome unique au cas d'un ensemble de $N > 1$ atomes.

- *Réseaux de neurones optiques.* Les atomes peuvent jouer le rôle de nœuds d'un réseau de neurones pouvant être entraîné en ajustant les positions atomiques (et donc en modifiant le couplage interatomique). Ce sujet fait l'objet d'une étude active [11].

- *Calcul par réservoir.* Même sans entraînement, un système quantique non linéaire peut être utile comme partie d'un réseau de neurones plus grand [12], avec une réalisation basée sur des atomes froids proposée très récemment [13].

Méthodes : Le projet s'appuiera sur l'utilisation à la fois des équations optiques de Maxwell-Bloch pour les opérateurs quantiques et de l'équation maîtresse de Lindblad pour la matrice de densité, afin de décrire le système de N atomes interagissant avec la lumière. Les équations seront résolues à l'aide de codes informatiques développés par le ou la doctorant-e, ainsi que de logiciels tiers standard (QuTiP, QuantumOptics.jl, etc.).

Profil du ou de la candidat-e : Le ou la candidat-e retenu-e devra avoir des connaissances solides en mécanique quantique, des compétences en calcul analytique et une expérience en programmation scientifique. Des connaissances en réseaux de neurones ainsi qu'une expérience dans l'écriture de codes pour GPU seront un atout.

Bibliographie

1. A. Browaeys & T. Lahaye, Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms, *Nat. Phys.* **16**, 132 (2020)
2. H.H. Jen, Photon-mediated dipole-dipole interactions as a resource for quantum science and technology in cold atoms, *Quantum Sci. Technol.* **10**, 023001 (2025)
3. Luis Ortiz-Gutiérrez et al., Mollow triplet in cold atoms, *New J. Phys.* **21**, 093019 (2019)
4. R. Vatré et al., Resonant light scattering by a slab of ultracold atoms, *Phys. Rev. A* **113**, L021301 (2026)
5. S.E. Skipetrov & I.M. Sokolov, Absence of Anderson Localization of Light in a Random Ensemble of Point Scatterers, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 023905 (2014)
6. O. Scarlatella and N.R. Cooper, Fate of the Mollow triplet in strongly coupled atomic arrays, *Phys. Rev. A* **110**, L041305 (2024)
7. M.A.F. Biscassi et al., Collective resonance displacement in strongly driven cold atoms, *Phys. Rev. A* **113**, 033111 (2026)
8. W. Guerin et al., Towards a random laser with cold atoms, *J. Opt.* **12**, 024002 (2010)
9. B. Grémaud & T. Wellens, Speckle Instability: Coherent Effects in Nonlinear Disordered Media, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 133901 (2010)
10. L. Carreño et al., Entanglement in Resonance Fluorescence, *npj Nanophoton.* **1**, 3 (2024)
11. B.P. Marsh et al., Multimode Cavity QED Ising Spin Glass, *Phys. Rev. Lett.* **135**, 160403 (2025)
12. S. Ghosh et al., Quantum reservoir processing, *npj Quantum Information* **5**, 35 (2019)
13. C. Zhu et al., Practical few-atom quantum reservoir computing, *Phys. Rev. Research* **7**, 023290 (2025)

PhD thesis proposal

Subject: Inelastic scattering of light by ensembles of cold atoms
Laboratory: Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés (LPMMC)
Supervisor: Sergey Skipetrov
Contact: <http://lpmmc.cnrs.fr/skipetrov>, Sergey.Skipetrov@lpmmc.cnrs.fr, (+33) 4 76 88 74 97

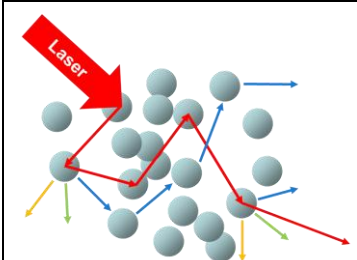


Figure. Schematic representation of an experiment in which powerful laser light (thick red arrow) is incident on an ensemble of cold atoms (cyan balls). The incident light is scattered by atoms both elastically (thin red arrows) and inelastically (i.e., with a change of frequency, arrows of other colors). One typically measures the power spectrum of scattered light, its evolution with time (dynamics), or the quantum state of scattered photons.

Context: Ensembles of cold atoms are well-controlled quantum systems of growing importance for various applications ranging from light generation (lasers) to metrology and quantum computing [1,2]. Experiments in which such ensembles are prepared, controlled and probed by optical radiation (light) are nowadays routinely performed around the world [3,4]. Nevertheless, the theoretical understanding of light-atom interaction in the regime of multiple scattering (i.e., for dense atomic ensembles) is still incomplete. While even the elastic (i.e., linear) scattering of a single photon by a large atomic ensemble remains a source of surprises [5], the real challenge is posed by inelastic (i.e., nonlinear) collective scattering of many photons – a process in which atoms allow photons to exchange energy and momenta, leading to generation of new components in the spectrum of scattered radiation [6,7]. Poor understanding of inelastic scattering and associated nonlinear optical phenomena limits the progress in using cold-atom systems as elements of useful optical devices.

This project: The purpose of this theoretical project is to study several practically important phenomena in which inelastic scattering is of crucial importance:

- *Random lasing.* The feedback provided by multiple scattering may lead to coherent emission of light even in the absence of cavity. As in the standard laser with a cavity, properties of emitted radiation are controlled by the nonlinearity of the system, which remains poorly understood [8].

- *Optical instability.* A nonlinear disordered medium interacting with light may become dynamically unstable and generate chaotic signal for a stationary, continuous excitation [9]. The observability of this phenomenon with cold atoms is still an open question.

- *Generation of nonclassical light.* Inelastically scattered photons may be in nontrivial quantum states (squeezed, entangled, etc.) even when the incident light is classical (standard laser light) [10]. We intend to extend the existing single-atom theory to the case of an ensemble of $N > 1$ atoms.

- *Optical neural networks.* Atoms can play a role of nodes of a neural network that can be trained by adjusting atomic positions (and thus modifying interatomic coupling). This subject is under an active study [11].

- *Reservoir computing.* Even without training, a nonlinear quantum system can be useful as a part of a larger neural network [12], with a cold-atom realization of such systems proposed very recently [13].

Methods: The project will rely on using both optical Maxwell-Bloch equations for quantum operators and Lindblad master equation for the density matrix to describe the system of N atoms interacting with light. The equations will be solved using computer codes to be written by the PhD student as well as standard third-party software packages (QuTiP, QuantumOptics.jl, etc.).

Candidate: Successful candidate is expected to have a background in quantum mechanics, analytical calculation skills, and some experience in scientific programming. Some knowledge of neural networks as well as experience in writing codes for GPUs would be an advantage.

Bibliography

1. A. Browaeys & T. Lahaye, Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms, *Nat. Phys.* **16**, 132 (2020)
2. H.H. Jen, Photon-mediated dipole-dipole interactions as a resource for quantum science and technology in cold atoms, *Quantum Sci. Technol.* **10**, 023001 (2025)
3. Luis Ortiz-Gutiérrez et al., Mollow triplet in cold atoms, *New J. Phys.* **21**, 093019 (2019)
4. R. Vatré et al., Resonant light scattering by a slab of ultracold atoms, *Phys. Rev. A* **113**, L021301 (2026)
5. S.E. Skipetrov & I.M. Sokolov, Absence of Anderson Localization of Light in a Random Ensemble of Point Scatterers, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 023905 (2014)
6. O. Scarlatella and N.R. Cooper, Fate of the Mollow triplet in strongly coupled atomic arrays, *Phys. Rev. A* **110**, L041305 (2024)
7. M.A.F. Biscassi et al., Collective resonance displacement in strongly driven cold atoms, *Phys. Rev. A* **113**, 033111 (2026)
8. W. Guerin et al., Towards a random laser with cold atoms, *J. Opt.* **12**, 024002 (2010)
9. B. Grémaud & T. Wellens, Speckle Instability: Coherent Effects in Nonlinear Disordered Media, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 133901 (2010)
10. L. Carreño et al., Entanglement in Resonance Fluorescence, *npj Nanophoton.* **1**, 3 (2024)
11. B.P. Marsh et al., Multimode Cavity QED Ising Spin Glass, *Phys. Rev. Lett.* **135**, 160403 (2025)
12. S. Ghosh et al., Quantum reservoir processing, *npj Quantum Information* **5**, 35 (2019)
13. C. Zhu et al., Practical few-atom quantum reservoir computing, *Phys. Rev. Research* **7**, 023290 (2025)