

Proposition d'un sujet de thèse

Sujet : Théorie des effets de localisation dans la dynamique des mélanges de gaz quantiques
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

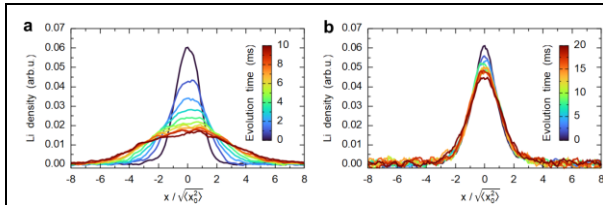


Figure. Profils de densité spatiale d'un nuage de Li en expansion. Les différentes couleurs correspondent à différents instants. À haute température, le nuage s'étend de manière diffuse (a). À basse température, l'expansion est arrêtée par des effets d'interférence (b). Figure issue de la réf. 5.

Contexte : Lorsqu'un gaz atomique classique est sorti de l'équilibre thermique, par exemple en modifiant localement sa température ou sa densité, l'évolution dynamique ultérieure (c'est-à-dire les collisions entre atomes) le ramène vers un état d'équilibre, dans lequel toute mémoire de la perturbation initiale est totalement effacée [1]. La situation est bien plus complexe dans un gaz quantique, où les atomes obéissent à l'équation de Schrödinger et où les effets d'interférence deviennent importants. La thermalisation pourrait ne pas toujours se produire malgré les collisions entre atomes, et le gaz pourrait conserver une mémoire de la perturbation initiale, même après un temps infiniment long. Ce phénomène est connu sous le nom de « localisation

à N corps » (« *many-body localization* », MBL), et sa compréhension théorique est notoirement difficile en raison de la croissance exponentielle de la dimensionnalité de l'espace de Hilbert avec le nombre d'atomes [2,3].

Ce projet : Un système particulier dans lequel la MBL pourrait être observée est un mélange de deux gaz quantiques différents avec un rapport élevé de masses atomiques M/m , ce qui implique des échelles de temps bien séparées pour la dynamique des deux composantes en l'absence d'interaction entre elles [4]. Il en résulte un intervalle de temps pendant lequel les atomes lourds (masse M) peuvent être considérés comme quasi immobiles, tandis que les atomes légers (masse $m \ll M$) subissent déjà de nombreuses collisions avec les atomes lourds. Durant cet intervalle, la compréhension de la dynamique atomique peut être partiellement atteinte en appliquant la théorie de la localisation d'Anderson (à une particule), où les atomes lourds jouent le rôle d'impuretés immobiles sur lesquelles les atomes légers diffusent. En ajustant l'intensité de cette diffusion via un champ magnétique externe (par le biais de la résonance de Feshbach), il est possible d'accéder à différents régimes dynamiques [5].

Ce projet de thèse théorique est motivé par des expériences menées par Matteo Zaccanti et ses collègues au Laboratoire Européen de Spectroscopie Non-Linéaire (LENS) à Florence, en Italie. Dans ces expériences, on observe l'expansion d'un petit nuage d'atomes fermioniques légers (${}^6\text{Li}$) libéré au sein d'un large échantillon tridimensionnel d'atomes fermioniques lourds (${}^{53}\text{Cr}$) [5]. Les observations expérimentales et leur analyse théorique initiale suggèrent des effets de localisation significatifs (voir Figure), mais l'analyse est compliquée par plusieurs aspects non pris en compte dans le modèle théorique existant : une large distribution en énergie des atomes légers ; un mouvement lent, mais non négligeable, des atomes lourds ; la statistique fermionique des deux espèces atomiques ; etc. L'objectif de ce projet est d'intégrer ces complications dans le modèle théorique et de fournir une explication exhaustive des observations expérimentales. La dépendance des résultats du rapport de masse M/m et de la statistique quantique des atomes (fermions vs bosons) sera également étudiée, et de nouvelles expériences seront proposées.

Méthodes : Nous prévoyons d'utiliser deux approches théoriques différentes mais complémentaires. La première consiste à résoudre l'équation de Schrödinger dépendante du temps pour la fonction d'onde des atomes légers, en supposant une diffusion par des atomes lourds immobiles ou en mouvement lent [6]. Les distributions de probabilité des quantités mesurables peuvent ensuite être prédites par la méthode de Monte-Carlo en prenant en compte la dépendance en énergie des effets d'interférence, le mouvement des atomes lourds et les corrélations dans leurs positions. La seconde approche repose sur la théorie auto-cohérente de la localisation, qui permet de calculer directement les quantités moyennes, sans moyenne explicite sur les réalisations aléatoires des positions des atomes lourds [7]. Moins microscopique que la première approche, cette théorie auto-cohérente offre une meilleure compréhension de la physique sous-jacente. Son efficacité à décrire les expériences de localisation a déjà été démontrée en acoustique [8], ainsi que dans le contexte de la physique des atomes froids [9,10].

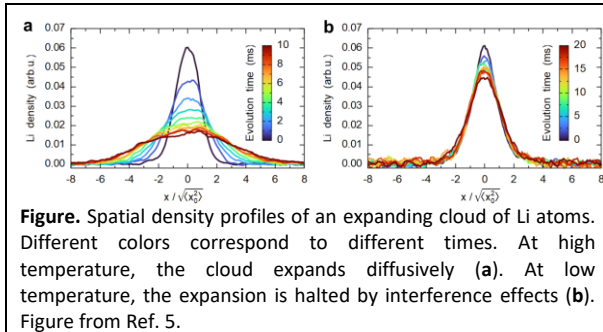
Profil du/de la candidat/e : Le/a candidat/e retenu/e devra avoir des connaissances solides en mécanique quantique, des compétences en calcul analytique et une certaine expérience en programmation scientifique.

Bibliographie

1. R.K. Pathria, *Statistical Mechanics* (Elsevier, 2016)
2. P. Sierant et al., Many-body localization in the age of classical computing, *Rep. Prog. Phys.* **88**, 026502 (2025)
3. F. Alet & N. Laflorencie, Many-body localization: an introduction and selected topics, *Comptes Rendus. Physique* **19**, 498 (2018)
4. A. Ciamei et al., Double-degenerate Fermi mixtures of ${}^6\text{Li}$ and ${}^{53}\text{Cr}$ atoms, *Phys. Rev. A* **106**, 053318 (2022)
5. S. Finelli et al., Anomalous diffusion and localization in a disorder-free atomic mixture, [arXiv:2601.13226](https://arxiv.org/abs/2601.13226)
6. S.E. Skipetrov, Finite-size scaling analysis of localization transition for scalar waves in a three-dimensional ensemble of resonant point scatterers, *Phys. Rev. B* **94**, 064202 (2016)
7. P. Wölfle & D. Vollhardt, Self-consistent theory of Anderson localization: general formalism and applications, *Int. J. Mod. Phys. B* **24**, 1526 (2010)
8. L.A. Cobus et al., Transverse confinement of ultrasound through the Anderson transition in three-dimensional mesoglasses, *Phys. Rev. B* **98**, 214201 (2018)
9. S.E. Skipetrov et al., Anderson localization of a Bose-Einstein condensate in a 3D random potential, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 165301 (2008)
10. J.-P. Banon et al., Energy-resolved transport of ultracold atoms across the Anderson transition: theory and experiment, [arXiv:2602.22063](https://arxiv.org/abs/2602.22063)

PhD thesis proposal

Subject: Theory of localization effects in dynamics of quantum gas mixtures
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



Context: When a classical atomic gas is driven out of the thermal equilibrium by, for example, locally modifying its temperature or density, the subsequent dynamic evolution (i.e., collisions between atoms) brings it back to the equilibrium state, in which the memory about the initial perturbation is completely erased [1]. The situation is much more complex in a quantum gas where atoms obey Schrodinger equation and where interference effects become important. Thermalization may not always take place despite collisions between atoms and the gas may retain memory about the initial perturbation even for infinitely long times. This phenomenon is known as “many-body localization” (MBL) and its theoretical understanding is notoriously

difficult due to the exponential scaling of Hilbert space dimensionality with the number of atoms [2,3].

This project: A particular system in which MBL may be expected is a mixture of two different quantum gases with a large atomic mass ratio M/m , implying well separated time scales for the dynamics of the two components in the absence of interaction between them [4]. As a result, a time interval exists during which heavy atoms (mass M) can be assumed almost immobile whereas light atoms (mass $m \ll M$) already experience many collisions with heavy ones. In this time interval, the understanding of the atomic dynamics can be partially achieved by applying the theory of (one-particle) Anderson localization in which heavy atoms play the role of immobile impurities on which light atoms scatter. Tuning the strength of this scattering by an external magnetic field via the so-called Feshbach resonance, allows for accessing different dynamic regimes [5].

This theoretical thesis project is motivated by experiments conducted by Matteo Zaccanti and his colleagues at European Laboratory for Non-Linear Spectroscopy (LENs) in Florence, Italy. In the experiment, one observes the expansion of a small cloud of light fermionic atoms (${}^6\text{Li}$) released inside a large, three-dimensional sample of heavy fermionic atoms (${}^{53}\text{Cr}$) [5]. Experimental observations and their initial theoretical analysis suggest significant localization effects (see Figure), but the analysis is complicated by several aspects that are not included in the existing theoretical model: wide distribution of light atoms in energy, leading to qualitatively different behaviors of different spectral components; slow but not fully negligible motion of heavy atoms during the experiment; fermionic statistics of both atomic species, implying nontrivial correlations in their spatial arrangements; etc. The purpose of this project is to include these complications in the theoretical model and provide a comprehensive explanation of experimental observations. Dependence of results on the mass ratio M/m and on the quantum statistics of atoms (fermions vs bosons) will also be studied and new experiments will be proposed.

Methods: We plan to follow two different but complementary theoretical approaches. The first one implies solving the time-dependent Schrödinger equation for the wave function of light atoms, assuming scattering by immobile or slowly moving heavy atoms at random but possibly correlated positions [6]. Probability distributions of measurable quantities can then be predicted by the Monte-Carlo method. In this approach, the energy dependence of interference effects, motion of heavy atoms, and correlations in their positions can be taken into account explicitly at the price of high (but affordable) computational cost. The second approach is based on the self-consistent theory of localization that allows for calculating average quantities directly, without explicit averaging over random realizations of heavy-atom positions [7]. Less microscopic than the first approach, the self-consistent theory allows for a better understanding of underlying physics. Its power in describing localization experiments has been already demonstrated in acoustics [8], as well in the context of cold-atom physics [9,10].

Candidate: Successful candidate is expected to have a background in quantum mechanics, analytical calculation skills, and some experience in scientific programming.

Bibliography

1. R.K. Pathria, *Statistical Mechanics* (Elsevier, 2016)
2. P. Sierant et al., Many-body localization in the age of classical computing, *Rep. Prog. Phys.* **88**, 026502 (2025)
3. F. Alet & N. Laflorencie, Many-body localization: an introduction and selected topics, *Comptes Rendus. Physique* **19**, 498 (2018)
4. A. Ciamei et al., Double-degenerate Fermi mixtures of ${}^6\text{Li}$ and ${}^{53}\text{Cr}$ atoms, *Phys. Rev. A* **106**, 053318 (2022)
5. S. Finelli et al., Anomalous diffusion and localization in a disorder-free atomic mixture, [arXiv:2601.13226](https://arxiv.org/abs/2601.13226)
6. S.E. Skipetrov, Finite-size scaling analysis of localization transition for scalar waves in a three-dimensional ensemble of resonant point scatterers, *Phys. Rev. B* **94**, 064202 (2016)
7. P. Wölfle & D. Vollhardt, Self-consistent theory of Anderson localization: general formalism and applications, *Int. J. Mod. Phys. B* **24**, 1526 (2010)
8. L.A. Cobus et al., Transverse confinement of ultrasound through the Anderson transition in three-dimensional mesoglasses, *Phys. Rev. B* **98**, 214201 (2018)
9. S.E. Skipetrov et al., Anderson localization of a Bose-Einstein condensate in a 3D random potential, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 165301 (2008)
10. J.-P. Banon et al., Energy-resolved transport of ultracold atoms across the Anderson transition: theory and experiment, [arXiv:2602.22063](https://arxiv.org/abs/2602.22063)