

Synthèse de thèse en français

présenté par

Fred Jendrzejewski

Titre:

**Transport quantique d'atomes ultrafroids dans des potentiels désordonnés**

soutenue le: 06/11/2012

Directeur de thèse:

Philippe Bouyer

# Chapitre 1 - Introduction

Le technique de refroidissement d'atomes modernes par refroidissement laser [Cohen-Tannoudji 98a, Phillips 98, Chu 98] et par refroidissement évaporatoire ont permis d'observer en 1995 [Ketterle 02, Cornell 02] l'accumulation d'un nombre macroscopique d'atomes alcalins dans un seul état quantique, appelé condensation de Bose-Einstein [Einstein 27]. Aujourd'hui, ces systèmes permettent un contrôle très précis des paramètres expérimentaux [Bloch 08]:

- Par le contrôle du potentiel de piégeage, il est possible de laisser les atomes évoluer dans différentes géométries. Ceci est particulièrement intéressant pour étudier des systèmes à basse dimension. Par exemple, il est possible d'observer un gaz de bosons dans le régime de Tonks-Girardeau dans une dimension (1D) [Kinoshita 04, Paredes 04] et la transition de Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) à deux dimensions (2D) [Hadzibabic 06].
- Les interactions entre particules sont bien maîtrisées par des résonances Fano-Feshbach, qui peuvent être contrôlées par des champs magnétiques [Chin 10].
- Le profil atomique peut être directement imagé, soit en mesurant l'absorption d'un laser à résonance traversant le nuage ou par mesure de la fluorescence émise par les atomes d'éclairage.

Par conséquent, il est désormais possible de réaliser des systèmes idéaux, qui nous permettent de simuler des problèmes complexes de la physique de la matière condensée. Deux exemples emblématiques illustrent parfaitement cette possibilité: la réalisation de la transition de Mott dans le modèle de Bose-Hubbard, qui décrit la compétition entre les interactions inter-atomiques et les sauts dans le réseau [Greiner 02], et l'observation de la liaison BEC-BCS, voir [Greiner 03, Bourdel 04] et les références incluses.

Dans ce contexte, le groupe du Pr. Alain Aspect a été le pionnier d'un autre type de simulateurs quantiques: l'étude des atomes ultrafroids dans des potentiels désordonnés contrôlée [Clément 05, Sanchez-Palencia 07, Billy 08]. L'étude de ces systèmes désordonnés est du plus grand intérêt: ils sont au cœur de nombreux phénomènes fondamentaux, tels que la localisation d'Anderson dans les conducteurs électroniques désordonnés [Anderson 58], la superfluidité dans les milieux poreux [Reppy 92] supraconductivité, et peut-être à haute Temperature critique [Goldman 98]. En dépit de nombreuses études, la compréhension de ces systèmes reste une tâche passionnante mais redoutable, de nombreuses questions restent en suspens ou même controversée (voir par exemple [Weichman 08, Aspect 09, Lagendijk 09, Sanchez-Palencia 10, Burmistrov 12]).

Quand je suis arrivé à la fin de l'année 2008, l'équipe venait de prouver le potentiel de leur dispositif expérimental avec les expériences marquantes dans lequel ils ont observé la célèbre localisation d'Anderson (AL) à une dimension [Billy 08, Roati 08]. AL est l'effet le plus emblématique du désordre, décrivant l'apparition d'états localisés à cause d'interférences entre des nombreux amplitudes de diffusion associés à la diffusion d'une particule quantique. Motivé par le succès de ces expériences, nous avons d'abord pour but de affiner notre compréhension de la AL dans une dimension (1D), puis de transposer le set-up de la hausse cas unidimensionnel. En fait, AL dépend fortement de la dimension du système [Abrahams 79]. Une transition de phase quantique autour d'un seuil de mobilité est prévue en trois dimensions (3D). Ce seuil de mobilité correspond à un seuil d'énergie qui sépare les états localisés des états étendus. La détermination de la valeur de ce seuil de mobilité et d'explorer le régime critique autour de lui reste un défi pour la théorie microscopique, des simulations numériques et des expériences [Lagendijk 09]. De

nos jours, le concept à l'origine très abstraite de AL a même acquis une certaine importance pour les applications possibles dans les fibres optiques [Karbasi 12] et peut-être même l'optimisation de l'efficacité des panneaux solaires [Vynck 12].

## Thèse

Cette thèse a été réalisée dans le groupe d'optique atomique, dirigée par Alain Aspect, à Palaiseau. Les résultats présentés dans ce qui suit ont été rendue possible que par l'effort commun de tous les membres de l'équipe, que j'ai eu le plaisir de travailler avec, le plus important Vincent Josse (notre chef d'équipe), Alain Bernard, Kilian Müller (doctorants) et Patrick Cheinet (le PostDoc).

Au début de ma thèse, nous avons considérablement amélioré notre configuration d'un atome guidée laser [Bernard 11]. Le premier objectif était d'étudier davantage la AL à 1D en prenant des mesures analogues à des mesures de conductance de la physique de la matière condensée. Avec l'amélioration de l'appareil, de telles études semblait possible, mais nous avons vu un plus grand impact possible par une investigation de la AL en trois dimensions (3D) et avons dans le suivant concentré notre travail sur ce nouveau sujet.

Pour étudier 3D AL, nous avons transposé le système qui a permis l'observation de la localisation d'Anderson à 1D dans le cas tridimensionnel. Par conséquent, nous avons conçu une nouvelle lévitation magnétique et crée un désordre très fine par la superposition cohérente de deux champs de tavelure. Au point où nous avons enfin pu commencer nos expériences sur la localisation d'Anderson à 3D, Alain et Patrick ont malheureusement dû quitter notre équipe sur leur chasse pour de nouveaux défis. Heureusement, le plus récent membre de l'équipe Kilian Müller est arrivé dans cette période très excitante. Dans ces expériences, nous avons suivi l'expansion en trois dimensions d'un BEC initial en présence d'un désordre et observé un nuage atomique composée de deux éléments: une partie localisée et une partie diffuse. La comparaison de ces expériences aux prédictions théoriques ont conduit à une étroite et fructueuse collaboration avec notre équipe de théorie de Marie Piraud, Luca Pezze et Laurent Sanchez-Palencia.

Convaincant que ces expériences sur la AL à 1D et 3D étaient, aucune de ces expériences comprend une preuve directe du rôle des interférences quantiques. Fait intéressant, une manifestation de premier ordre de la cohérence, même dans une faible désordre est observable. L'interférence entre les chemins de diffusion multiple conduit au phénomène de rétrodiffusion cohérente (CBS), à savoir l'augmentation de la probabilité de diffusion dans la direction vers l'arrière, en raison d'une interférence quantique des amplitudes associées à deux voies opposées de diffusion multiple [Watson 69, Tsang 84, Akkermans 86, Langer 66, Gor'kov 79, Abrahams 79].

Dans la dernière partie de ma thèse, nous avons travaillé sur l'observation directe d'un tel signal de CBS, qui est un signal direct du rôle de la cohérence quantique dans le transport quantique dans les milieux désordonnés. Un nuage d'atomes ultra-froids sans interactions a été lancé avec une distribution de vitesse étroit dans un champs de tavelures allongée. Par imagerie de temps de vol, après un temps  $t$  de propagation dans le désordre, nous avons directement obtenu la distribution en impulsion. La caractéristique la plus importante pour nous est le pic de grande visibilité, qui s'accumule dans le sens rétrograde, car il correspond au signal de CBS.

## *Chapitre 2 - La propagation des ondes dans le désordre*

Le transport quantique diffère du transport classique par le rôle crucial des effets de cohérence. Dans le cas des milieux désordonnés, elle peut conduire à l'annulation complète de transport lorsque le désordre est assez fort: c'est la célèbre localisation Anderson (AL) [Anderson 58]. Nous discutons brièvement comment les interférences peuvent conduire à la localisation faible, ce qui est un précurseur d'AL, et donner un rapide aperçu de quelques expériences importantes sur le sujet. Nous discutons ensuite quelques propriétés générales des AL et l'état d'art des résultats expérimentaux sur ce sujet passionnant et en évolution rapide.

## *Chapitre 3 - La production des ondes de matière cohérentes*

Les condensats de Bose-Einstein (BEC) de nuages atomiques dilués offrent des occasions uniques pour explorer des phénomènes quantiques à l'échelle macroscopique. Ils ont d'abord été réalisées en 1995 dans le groupe de Boulder avec des atomes de rubidium [Anderson 95] et quelques mois plus tard dans le groupe Ketterle au MIT avec des atomes de sodium [Davis 95a]. Dans ces expériences, un nuage dilué est refroidi à des températures dans le régime de nano-Kelvin. À une température critique, les paquets d'ondes des atomes bosoniques différents se superposent et en résultat la condensation de Bose-Einstein à lieu. Dans un tel condensat de l'état de plus basse énergie est collectivement occupé par un nombre macroscopique d'atomes. Avec notre dispositif expérimental nous préparons condensat avec plusieurs milliers d'atomes à un nK comme un point de départ pour nos expériences ultérieures avec des atomes ultrafroids dans un désordre speckle potentiel.

Nous commençons ce chapitre par une brève introduction à la description théorique de Bose-Einstein. Nous décrivons ensuite le dispositif expérimental pour la production du condensat de Bose-Einstein.

## *Chapitre 4 - Caractéristiques d'un champs de tavelures tridimensionnel*

L'un des intérêts majeurs de l'utilisation d'atomes ultrafroids pour l'étude de la localisation d'Anderson vient de la grande flexibilité et le bon contrôle des potentiels désordonnés dans lesquels les atomes évoluent. Plusieurs méthodes permettent de créer des désordres de ce type. Un réseau peut être perturbé par la présence d'une espèce différente d'atomes, confinés dans les puits du potentiel [Gavish 05, Massignan 06]. Ces atomes jouent alors le rôle des impuretés dans le système. Il est aussi possible d'utiliser réseaux optiques bichromatiques, dont les fréquences choisies sont incommensurables. De cette façon, l'atome se propage dans un potentiel avec symétrie de translation brisée. La dynamique d'un tel quasi-désordre quasi est décrite par le modèle Andre-Aubry [Grempe 82, Roth 03].

Dans nos expériences, nous avons choisi de créer le désordre à trois dimensions par un champ de tavelures optique. Il correspond à la distribution d'intensité spatiale aléatoire qui résulte de la diffraction cohérente d'un laser sur une surface rugueuse. Les atomes placés dans un tel champ lumineux sent un potentiel optique dipolaire  $V(r)$ , directement proportionnel à l'intensité du laser et donc spatialement aléatoire. Comme les propriétés statistiques d'un tel champ de speckle sont bien connus [Goodman 07], le potentiel dipolaire créé par elle est parfaitement contrôlée [Clément 06], que ce soit pour sa corrélation ou la loi de distribution de son amplitude.

Dans ce chapitre, nous discutons dans un premier temps les propriétés générales d'un tel désordre. Nous présentons ensuite les quantités les plus importantes pour caractériser un désordre. La répartition de l'intensité  $P(I)$  décrit la probabilité de rencontrer une intensité spécifique  $I$ . La fonction de corrélation  $C(R)$  et de la densité spectrale de puissance nous permet de quantifier la taille des grains dans les différentes directions de la longueur de corrélation  $\sigma_R$ . Dans ce contexte, nous comprenons que le champ de tavelures est un désordre corrélé formé par des grains anisotropes allongés.

Enfin, nous montrons comment nous avons réduit cette anisotropie par une interférence de deux champs de tavelures perpendiculaires. Nous discutons les propriétés de cette superposition et la façon dont elles sont contrôlées par l'interférence entre les deux champs.

## *Chapitre 5 - Quelques notions de la diffusion et de la localisation des ondes de matière*

Les interférences quantiques jouent un rôle fondamental pour les propriétés des interférences des systèmes désordonnés, car ils peuvent éventuellement conduire à la localisation d'Anderson (AL). Dans ce chapitre, nous allons discuter des différentes quantités physiques macroscopiques et microscopiques qui décrivent les propriétés de ce système. Dans la première partie de ce chapitre, nous fournissons quelques notions importantes dans le contexte de l'AL, qui mettent en évidence l'importance des interférences et de la dimensionnalité. Dans la deuxième partie, nous discutons l'influence de plusieurs paramètres microscopiques en détail.

Nous voulons ajouter ici un mot d'avertissement. Autant que possible, nous avons essayé d'utiliser des explications physiques et simples des différentes quantités présentées dans ce chapitre. La plupart d'entre eux donnent des résultats qualitativement corrects, mais ne permettent pas de faire des prédictions quantitatives. Souvent, une telle prédiction théorique irait bien au-delà de la portée de ce chapitre, car la plupart des quantités intéressantes sont encore l'objet d'une intense activité de recherche au moment où nous écrivons ce manuscrit.

## *Chapitre 6 - Des expériences sur la localisation à 3D*

La localisation d'Anderson (AL) a été proposée il y a plus de 50 ans [Anderson 58] pour comprendre comment le désordre peut conduire à l'annulation totale de la conduction des électrons dans certains matériaux. Cette effet à une particule purement quantique peut être interprétée comme étant due à des interférences entre les différentes amplitudes associées aux chemins de diffusion d'une onde se propageant entre le système

désordonne. Selon la célèbre théorie d'échelle [Abrahams 79], la AL dépend de la dimension du système, et dans à trois dimensions (3D) un seuil de mobilité est prédite. Il s'agit d'un seuil d'énergie séparant les états localisés des états de diffusion. Cependant, déterminer la valeur exacte du seuil de mobilité et le comportement critique correspondante autour d'elle, demeure un défi pour la théorie microscopique, des simulations numériques et des expériences. La quête de l'AL a été poursuivi non seulement dans la physique de la matière condensée [Lee 85], mais aussi en physique des ondes classiques [van Tiggelen 99], et les expériences ont été réalisées avec des ondes lumineuses [Wiersma 97, Störzer 06, Schwartz 07, Lahini 08], micro-ondes [Chabanov 00] et ondes acoustiques [Hu 08]. De nos jours, les atomes ultrafroids se sont révélés être un système idéal pour l'étude de l'AL. Après des propositions théoriques [Damski 03, Sanchez-Palencia 07, Kuhn 07, Skipetrov 08], des expériences récentes ont montré que les atomes ultrafroids dans le désordre optique constituent un système remarquable pour étudier la localisation 1D [Billy 08, Roati 08] ou la diffusion 2D [Robert-Saint-Vincent 10, Pezze 11] des ondes de matière.

Nous rapportons ici l'observation de la localisation à 3D des atomes ultrafroids d'un condensat de Bose-Einstein (BEC), suspendu contre la gravité, et publié dans un potentiel désordonné 3D optique. Notre expérience est une généralisation de celui qui nous a permis de démontrer AL à 1D. Par conséquent, je commence le chapitre par une discussion sur les expériences 1D. Additionnellement à sa valeur historique, il permet de présenter les paramètres importants dont nous disposons pour contrôler de telles expériences. Il s'agit d'un exemple classique des résultats magnifiques que ces expériences d'expansion peuvent fournir. Avant de discuter nos résultats expérimentaux sur la localisation 3D, je présente les principales idées qui nous ont guidés tout, nous avons créé la nouvelle expérience. Dans la dernière partie de ce chapitre, je présente plusieurs autres études que nous avons commencé dans le but de contrôler la distribution d'énergie des atomes dans le désordre et de tester l'influence des propriétés microscopiques de la maladie.

## *Chapitre 7 - Des expériences sur la rétrodiffusion cohérente*

Les effets d'interférences quantiques jouent un rôle fondamental dans notre compréhension du transport quantique à travers les milieux désordonnés, car il peut conduire à la suppression des transports localisation, c'est-à-dire la localisation d'Anderson (AL). Nous avons présenté dans le chapitre précédent qu'il est devenu récemment possible d'observer directement la localisation d'Anderson avec des atomes ultra-froids dans une dimension [Billy 08, Roati 08] et trois dimensions [Kondov 11, Jendrzejewski 12a]. Convaincants soient-ils, aucune de ces expériences fournit une preuve directe du rôle de la cohérence.

Pour un désordre faible, une manifestation de premier ordre de la cohérence est le phénomène de la rétrodiffusion cohérent (CBS), c'est à dire l'amélioration de la probabilité de diffusion dans la direction vers l'arrière, en raison d'une interférence quantique des amplitudes associé à deux voies opposées de diffusion multiple [Watson 69, Tsang 84, Akkermans 86, Langer 66, Gor'kov 79, Abrahams 79]. A l'observation directe d'un tel pic est une preuve irréfutable de l'existence de la cohérence quantique dans le transport quantique dans les milieux désordonnés.

Dans ce chapitre, nous présentons l'observation directe de CBS avec des atomes ultrafroids, dans une configuration quasi bidimensionnel (2D). Après un bref examen du mécanisme de CBS, nous discutons notre séquence expérimentale. Nous présentons ensuite comment ces expériences nous ont permis de mesurer le temps de diffusion et le temps de transport, avant que nous tournons notre attention vers l'analyse du signal de CBS. Les résultats de ces expériences ont été affichés sur le arXiv dans Jendrzejewski et al, "rétrodiffusion cohérente d'atomes ultrafroids", arXiv: 1207.4775. Lors de la préparation de ce manuscrit, nous avons été mis au courant d'une observation indépendante similaire [Labeyrie 12]. Nous concluons ce chapitre par la présentation des premiers résultats de la dépendance énergétique de la dispersion et le temps de transport.

## *Chapitre 8 - Conclusion*

Dans ce manuscrit, nous avons présenté notre travail sur le transport quantique des ondes de matière dans un désordre speckle. En particulier, nous avons mis en évidence la localisation d'Anderson en trois dimensions et nous avons rapporté l'observation directe de rétrodiffusion cohérente d'atomes ultrafroids.

Nous avons fait expliqué comment nous avons transposé le système qui a permis l'observation de la localisation d'Anderson à 1D pour le cas tridimensionnel. Ensuite, nous avons détaillé nos expériences d'expansion, où nous avons suivi l'expansion d'un BEC initial en présence d'un laser quasi-isotrope champs de tavelures à trois dimensions. Nous avons observé un nuage atomique composée de deux éléments: une partie localisée et une partie diffusive. Ces composantes correspondent respectivement aux niveaux d'énergie au-dessous et au-dessus du seuil de mobilité. Dans ces expériences, il n'a pas été possible de parvenir à un régime où tous les atomes ont été localisés, en raison de la large distribution d'énergie des atomes induite par le désordre. Néanmoins, l'existence d'une fraction localisée est au-delà de tout doute raisonnable. Au total, ces expériences nous ont permis de signaler la première indication de la localisation d'Anderson à 3D en présence d'un désordre optique bien contrôlée. Il s'agit d'une première étape vers l'étude précise du comportement critique autour du seuil de mobilité avec des atomes ultrafroids.

Il appartient désormais aux futurs efforts visant à parvenir à un meilleur contrôle et la détection de la distribution d'énergie. D'autres travaux peuvent être inspirés par les expériences sur le spectre d'excitation à une particule d'un gaz de Fermi fortement l'interaction par le Groupe Jin [Stewart 08], qui a été plus récemment appliquée à l'étude de l'isolant de Mott en utilisant la diffraction de Bragg [Clement 09].

De plus, nous avons démontré expérimentalement que l'étude résolue en temps de la distribution en impulsion des atomes ultrafroids dans un potentiel aléatoire est un outil puissant pour étudier les propriétés de transport quantique dans les milieux désordonnés. Nous avons été en mesure d'extraire le temps de diffusion élastique, le temps de transport, et d'observer le pic CBS. Toutes les observations expérimentales sont compatibles avec les simulations numériques et les théories microscopiques sans aucun paramètres libres. De telles études sur le rôle de la cohérence pourrait être approfondie par le brouillage de la phase, ce qui devrait conduire à la suppression du pic CBS [Golubentsev 84], ou par déphasage des chemins de diffusion multiple-contrapropagantes à l'aide des champs de jauge artificiels [Lin 09]. L'opportunité la plus excitante semble être l'enquête sur les phénomènes de la diffusion cohérente vers l'avant, qui devrait être étroitement liés à la localisation d'Anderson [Karpiuk 12]. Une observation de ce nouveau phénomène constituerait un nouvel outil pour étudier le rôle de l'interférence joué dans le régime de fort désordre.

Ces enquêtes promettent de donner une connaissance plus approfondie sur le problème de la localisation d'Anderson. Cette compréhension affinée de la Anderson localisation permettra de tester les théories microscopiques possibles, de la Anderson localisation à 3D. Un accord quantitatif des observations expérimentales avec une théorie microscopique est un objectif toujours debout, même après plus de 50 années de recherche sur le sujet. J'ai bon espoir que cet accord sera atteint dans un avenir proche et je souhaite les personnes qui continuent à travailler sur le sujet tout la meilleure chance ...

## Bibliographie

- [Abrahams 79] E. Abrahams, P. W. Anderson, D. C. Licciardello & T.V. V. Ramakrishnan. *Scaling Theory of Localization: Absence of Quantum Diffusion in Two Dimensions*. Physical Review Letters, vol. 42, no. 10, page 673, 1979.
- [Akkermans 86] Eric Akkermans, P.E. E. Wolf & R. Maynard. *Coherent Backscattering of Light by Disordered Media: Analysis of the Peak Line Shape*. Physical Review letters, vol. 56, no. 14, page 1471, 1986.
- [Anderson 58] P. W. Anderson. *Absence of Diffusion in Certain Random Lattices*. Physical Review, vol. 109, no. 5, page 1492, 1958.
- [Anderson 95] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman & E. A. Cornell. *Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor*. Science, vol. 269, no. 5221, page 198, 1995.
- [Aspect 09] Alain Aspect & Massimo Inguscio. *Anderson localization of ultracold atoms*. Physics Today, vol. 62, no. August, page 30, 2009.
- [Bernard 11] Alain Bernard, William Guerin, Juliette Billy, Fred Jendrzejewski, Patrick Cheinet, Alain Aspect, Vincent Josse & Philippe Bouyer. *Quasi-continuous horizontally guided atom laser: coupling spectrum and flux limits*. New Journal of Physics, vol. 13, no. 6, page 065015, June 2011.
- [Billy 08] Juliette Billy, Vincent Josse, Zhanchun Zuo, Alain Bernard, Ben Hambrecht, Pierre Lukan, David Clément, Laurent Sanchez-Palencia, Philippe Bouyer & Alain Aspect. *Direct observation of Anderson localization of matter waves in a controlled disorder*. Nature, vol. 453, no. 7197, page 891, June 2008.
- [Bloch 08] Immanuel Bloch, Jean Dalibard & Wilhelm Zwerger. *Many-body physics with ultracold gases*. Reviews of Modern Physics, vol. 80, no. 3, page 885, July 2008.
- [Bourdel 04] T. Bourdel, L. Khaykovich, J. Cubizolles, J. Zhang, F. Chevy, M. Teichmann, L. Tarruell, S. Kokkelmans & C. Salomon. *Experimental Study of the BEC-BCS Crossover Region in Lithium 6*. Physical Review Letters, vol. 93, no. 5, page 050401, July 2004.
- [Burmistrov 12] I. Burmistrov, I. Gornyi & A. Mirlin. *Enhancement of the Critical Temperature of Superconductors by Anderson Localization*. Physical Review Letters, vol. 108, no. 1, page 017002, January 2012.
- [Chabanov 00] A. A. Chabanov, M. Stoytchev & A. Z. Genack. *Statistical signatures of photon localization*. Nature, vol. 404, no. 6780, page 850, April 2000.
- [Chu 98] Steven Chu. *The manipulation of neutral particles*. Reviews of Modern Physics, vol. 70, no. 3, page 685, 1998.

- [Clément 05] D. Clément, A. Varón, M. Hugbart, J. A. Retter, P. Bouyer, L. Sanchez-Palencia, D. M. Gangardt, G. V. Shlyapnikov & A. Aspect. *Suppression of Transport of an Interacting Elongated Bose-Einstein Condensate in a Random Potential*. Physical Review Letters, vol. 95, no. 17, page 170409, October 2005.
- [Clément 06] D. Clément, A. F. Varón, J. A. Retter, L. Sanchez-Palencia, A. Aspect & P. Bouyer. *Experimental study of the transport of coherent interacting matter-waves in a 1D random potential induced by laser speckle*. New Journal of Physics, vol. 8, no. 8, page 165, August 2006.
- [Clément 09] David Clément, N. Fabbri, L. Fallani, C. Fort & M. Inguscio. *Multi-band spectroscopy of inhomogeneous Mott-insulator states of ultracold bosons*. New Journal of Physics, vol. 11, no. 10, page 103030, October 2009.
- [Cohen-Tannoudji 98a] C. Cohen-Tannoudji. *Manipulating atoms with photons*. Reviews of Modern Physics, vol. 70, no. 3, page 707, 1998.
- [Cornell 02] E. A. Cornell & C. E. Wieman. *Nobel Lecture: Bose-Einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments*. Reviews of Modern Physics, vol. 74, no. 3, page 875, August 2002.
- [Damski 03] B. Damski, J. Zakrzewski, L. Santos, P. Zoller & M. Lewenstein. *Atomic Bose and Anderson Glasses in Optical Lattices*. Physical Review Letters, vol. 91, no. 8, page 080403, August 2003.
- [Davis 95a] K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. Van Druten, D. S. Durfee, D. M. Stamper-Kurn & W. Ketterle. *Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms*. Physical Review Letters, vol. 75, no. 22, page 3969, 1995.
- [Einstein 27] Albert Einstein. *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*. In Sitzungsberichte der Preussischen Wissenschaften Akademie Berlin, 1927.
- [Gavish 05] Uri Gavish & Yvan Castin. *Matter-Wave Localization in Disordered Cold Atom Lattices*. Physical Review Letters, vol. 95, no. 2, page 020401, July 2005.
- [Goldman 98] Allen M Goldman & Nina Markovic. *Superconductor-Insulator Transitions in the Two-Dimensional Limit*. Physics Today, vol. 51, no. 11, page 39, 1998.
- [Golubentsev 84] A A Golubentsev. *Suppression of interference effects in multiple scattering of light*. Sov. Phys. JETP, vol. 59, no. 1, page 26, 1984.
- [Goodman 07] J W Goodman. *Speckle phenomena in optics: theory and applications*. Roberts & Co., 2007.
- [Gor'kov 79] L. P. Gor'kov, A. I. Larkin & D. E. Khmel'nitskii. *Particle conductivity in a two-dimensional random potential*. JETP Letters, vol. 30, no. 4, page 228, 1979.
- [Greiner 02] Markus Greiner, Olaf Mandel, Tilman Esslinger, Theodor W Hänsch & Immanuel Bloch. *Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms*. Nature, vol. 415, no. 6867, page 39, January 2002.
- [Greiner 03] Markus Greiner, Cindy A Regal & Deborah S Jin. *Emergence of a molecular Bose-Einstein condensate from a Fermi gas*. Nature, vol. 426, no. 6966, page 537, December 2003.
- [Grepel 82] D. R. Grempel, Shmuel Fishman & R. E. Prange. *Localization in an Incommensurate Potential: An Exactly Solvable Model*. Physical Review Letters, vol. 49, no. 11, page 833, 1982.

- [Hadzibabic 06] Zoran Hadzibabic, Peter Krüger, Marc Cheneau, Baptiste Battelier & Jean Dalibard. *Berezinskii-Kosterlitz-Thouless crossover in a trapped atomic gas*. Nature, vol. 441, no. 7097, page 1118, June 2006.
- [Hu 08] Hefei Hu, A. Strybulevych, J. H. Page, Sergey E Skipetrov & Bart A van Tiggelen. *Localization of ultrasound in a three-dimensional elastic network*. Nature Physics, vol. 4, no. 12, page 945, October 2008.
- [Karbasi 12] Salman Karbasi, Craig R Mirr, Ryan J Fraizer, Gandomkar Yarandi, Karl W Koch & Arash Mafi. *Detailed investigation of the impact of the fiber design parameters on the transverse Anderson localization of light in disordered optical fibers*. Optics Express, vol. 20, no. 17, page 18692, 2012.
- [Karpiuk 12] T. Karpiuk, N. Cherroret, K. L. Lee, Benoît Grémaud, Cord A. Müller & C. Miniatura. *Coherent multiple forward scattering peak unveiled by Anderson localization*. arXiv, page 1204.3451, 2012.
- [Ketterle 02] Wolfgang Ketterle. *Nobel lecture : When atoms behave as waves : Bose-Einstein condensation and the atom laser*. Reviews of Modern Physics, vol. 74, no. October, page 1131, 2002.
- [Kinoshita 04] Toshiya Kinoshita, Trevor Wenger & David S Weiss. *Observation of a one-dimensional Tonks-Girardeau gas*. Science, vol. 305, no. 5687, page 1125, August 2004.
- [Kuhn 07] R. C. Kuhn, O. Sigwarth, C. Miniatura, D. Delande & Cord A. Müller. *Coherent matter wave transport in speckle potentials*. New Journal of Physics, vol. 9, no. 6, page 161, June 2007.
- [Labeyrie 12] Guillaume Labeyrie, Tomasz Karpiuk, Benoît Grémaud, Christian Miniatura & Dominique Delande. *Coherent backscattering of a dilute Bose-Einstein condensate*. Arxiv, page 1206.0845, 2012.
- [Lagendijk 09] A. Lagendijk, Bart van Tiggelen & Diederik S. Wiersma. *Fifty years of Anderson localization*. Physics Today, vol. 62, no. 8, page 24, 2009.
- [Lahini 08] Yoav Lahini, Assaf Avidan, Francesca Pozzi, Marc Sorel, Roberto Morandotti, Demetrios Christodoulides & Yaron Silberberg. *Anderson Localization and Nonlinearity in One-Dimensional Disordered Photonic Lattices*. Physical Review Letters, vol. 100, no. 1, page 013906, January 2008.
- [Langer 66] J. S. Langer & T. Neal. *Breakdown of the concentration expansion for the impurity resistivity of metals*. Physical Review Letters, vol. 16, no. 22, page 984, 1966.
- [Lee 85] Patrick A. Lee & T.V. Ramakrishnan. *Disordered electronic systems*. Reviews of Modern Physics, vol. 57, no. 2, page 287, 1985.
- [Lin 09] Y.-J. Lin, R. L. Compton, K. Jiménez-García, J. V. Porto & I. B. Spielman. *Synthetic magnetic fields for ultracold neutral atoms*. Nature, vol. 462, no. 7273, page 628, December 2009.
- [Massignan 06] Pietro Massignan & Yvan Castin. *Three-dimensional strong localization of matter waves by scattering from atoms in a lattice with a confinement-induced resonance*. Physical Review A, vol. 74, no. 1, page 013616, July 2006.
- [Paredes 04] B. Paredes, A. Widera, V. Murg, O. Mandel, Simon Fölling, Ignacio Cirac, G. V. Shlyapnikov, Theodor W. Hänsch & Immanuel Bloch. *Tonks – Girardeau gas of ultracold atoms in an optical lattice*. Nature, vol. 429, page 277, 2004.
- [Pezze 11] L. Pezzé, M. Robert-de Saint-Vincent, T. Bourdel, J.-P. Brantut, B. Allard, T. Plisson, A. Aspect, P. Bouyer & L. Sanchez-Palencia. *Regimes of classical transport of*

*cold gases in a two-dimensional anisotropic disorder*. New Journal of Physics, vol. 13, no. 9, page 095015, September 2011.

[Phillips 98] W. D. Phillips. *Laser cooling and trapping of neutral atoms*. Reviews of Modern Physics, vol. 70, no. 3, page 721, 1998.

[Roati 08] Giacomo Roati, Chiara D'Errico, Leonardo Fallani, Marco Fattori, Chiara Fort, Matteo Zaccanti, Giovanni Modugno, Michele Modugno & Massimo Inguscio. *Anderson localization of a non-interacting Bose-Einstein condensate*. Nature, vol. 453, no. 7197, page 895, June 2008.

[Robert-Saint-Vincent 10] M. Robert-de Saint-Vincent, J.-P. Brantut, B. Allard, T. Plisson, L. Pezzé, L. Sanchez-Palencia, A. Aspect, T. Bourdel & P. Bouyer. *Anisotropic 2D Diffusive Expansion of Ultracold Atoms in a Disordered Potential*. Physical Review Letters, vol. 104, no. 22, page 220602, June 2010.

[Roth 03] Robert Roth & Keith Burnett. *Phase diagram of bosonic atoms in two-color superlattices*. Physical Review A, vol. 68, no. 2, page 023604, August 2003.

[Sanchez-Palencia 07] Laurent Sanchez-Palencia, David Clément, Pierre Lugan, Philippe Bouyer, G. V. Shlyapnikov & Alain Aspect. *Anderson Localization of Expanding Bose-Einstein Condensates in Random Potentials*. Physical Review Letters, vol. 98, no. 21, page 210401, May 2007.

[Sanchez-Palencia 10] Laurent Sanchez-Palencia & Maciej Lewenstein. *Disordered quantum gases under control*. Nature Physics, vol. 6, no. 2, page 87, 2010.

[Schwartz 07] Tal Schwartz, Guy Bartal, Shmuel Fishman & Mordechai Segev. *Transport and Anderson localization in disordered two-dimensional photonic lattices*. Nature, vol. 446, no. March, page 52, March 2007.

[Skipetrov 08] Sergey E Skipetrov, A. Minguzzi, Bart A. van Tiggelen & Boris Shapiro. *Anderson Localization of a Bose-Einstein Condensate in a 3D Random Potential*. Physical Review Letters, vol. 100, no. 16, page 165301, April 2008.

[Stewart 08] J. T. Stewart, J. P. Gaebler & D. S. Jin. *Using photoemission spectroscopy to probe a strongly interacting Fermi gas*. Nature, vol. 454, page 744, August 2008.

[Störzer 06] Martin Störzer, Peter Gross, Christof Aegerter & Georg Maret. *Observation of the Critical Regime Near Anderson Localization of Light*. Physical Review Letters, vol. 96, no. 6, page 063904, February 2006.

[Tsang 84] L Tsang & A Ishimaru. *Backscattering enhancement of random discrete scatterers*. Journal of the Optical Society of America A, vol. 1, no. 8, page 836, 1984.

[van Tiggelen 99] Bart A van Tiggelen. *Localization of Waves*. In Jean-Pierre Fouque, editeur, *Diffusive Waves in Complex Media*, Numéro 531 de NATO ASI series: Mathematical and physical sciences NATO Advanced Science Institutes Series Volume 531 de NATO Science Series C, page 459. Kluwer Academic Publishers, 1999.

[Vynck 12] Kevin Vynck, Matteo Burrelli, Francesco Riboli & Diederik S. Wiersma. *Disordered Optical Modes for Photon Management*. arXiv, page 1202.4601, 2012.

[Watson 69] Kenneth M Watson. *Multiple Scattering of Electromagnetic Waves in an Underdense Plasma*. Journal of Mathematical Physics, vol. 10, page 688, 1969.

[Weichman 08] Peter B Weichman. *Dirty Bosons: Twenty Years Later*. Modern Physics Letters B, 2008.

[Wiersma 97] D. S. Wiersma, Paolo Bartolini, A Lagendijk & Roberto Righini. *Localization of light in a disordered medium*. Nature, vol. 390, no. 6661, page 671, 1997.