

# INTRO UNE INTRODUCTION À TION DUC TION

## ATOMES, IONS, MOLECULES ULTRAFROIDS ET TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Robin Kaiser, Michèle Leduc et Hélène Perrin

*Préface d'Alain Aspect*

edp sciences

## ATOMES, IONS, MOLÉCULES ULTRAFROIDS ET TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Les physiciens savent produire des gaz à quelques milliardièmes de degrés au-dessus du zéro absolu. Les méthodes de refroidissement s'appliquent non seulement aux atomes mais aussi aux ions et aux molécules. Ce domaine de recherche a été couronné deux fois par le prix Nobel.

Il s'est extraordinairement enrichi depuis que l'on sait faire varier à volonté les interactions entre les particules et piéger celles-ci avec des pinces optiques ou dans des réseaux optiques à la géométrie ajustable. On édifie ainsi des cristaux artificiels formés d'atomes ou de molécules qui peuvent simuler la structure de la matière et élucider certaines de ses propriétés magnétiques, avec la perspective d'expliquer un jour la supraconductivité à haute température.

Le phénomène d'intrication quantique est à la base de nouveaux dispositifs pour le stockage et la transmission de l'information quantique.

Des progrès spectaculaires sont constamment enregistrés en métrologie. Ainsi des horloges à atomes ou à ions ultrafroids mesurent le temps à mieux qu'une seconde sur la durée de l'Univers. Des gravimètres et gyromètres industriels d'un type nouveau améliorent la sensibilité de la sismologie et la navigation dans l'espace.

En outre, l'extrême précision des mesures permet de tester les lois fondamentales de la physique, par exemple l'électrodynamique quantique, l'invariance de Lorentz ou les éventuelles variations des constantes fondamentales. Le domaine des particules ultrafroides rejoint aujourd'hui ceux de la matière condensée, de la chimie et même de la cosmologie.

*Robin Kaiser est directeur de recherche CNRS à l'Institut de physique de Nice à l'université de la Côte d'Azur*

*Michèle Leduc est directrice de recherche CNRS émérite au Laboratoire Kastler-Brossel à l'École normale supérieure à Paris*

*Hélène Perrin est directrice de recherche au Laboratoire de physique des lasers à l'université Sorbonne Paris Nord*

Isbn : 978-2-7598-2377-2



9 782759 823772

Création graphique : Béatrice Couëdel

**edp sciences**  
www.edpsciences.org

La collection « **UNE INTRODUCTION À...** » se propose de faire connaître à un large public les avancées les plus récentes de la science. Les ouvrages sont rédigés sous une forme simple et pédagogique par les meilleurs experts français.

**Collection « Une Introduction à »  
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac**

# **Atomes, ions, molécules ultrafroids et les technologies quantiques**

**Robin Kaiser,  
Michèle Leduc et Hélène Perrin**



EDP Sciences  
17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

## Dans la même collection

*Le climat : la Terre et les Hommes*

Jean Poitou, Pascale Braconnot et Valérie Masson-Delmotte

*Le laser*

Fabien Bretenaker et Nicolas Treps

*Le temps : mesurable, réversible, insaisissable ?*

Mathias Fink, Michel Le Bellac et Michèle Leduc

*La révolution des exoplanètes*

James Lequeux, Thérèse Encrenaz et Fabienne Casoli

*À l'orée du cosmos*

Alain Omont

*Le temps des neurones – Les horloges du cerveau*

Dean Buonomano, traduit par Michel Le Bellac

*Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps*

Stéphane Collion

*Quantique : au-delà de l'étrange*

Philip Ball, traduit par Michel Le Bellac

*Un siècle de gravitation*

Ron Cowen, traduit par Michel Le Bellac

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur <http://laboutique.edpsciences.fr>

Illustration de couverture : Christoph Hohmann (LMU München / MCQST)

*Imprimé en France*

**ISBN (papier) : 978-2-7598-2377-2 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2510-3**

© 2020, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

# Avant-propos

**Robin Kaiser**

*directeur de recherche au CNRS, Institut de physique de Nice*

**Michèle Leduc**

*directrice de recherche émérite au CNRS, Laboratoire Kastler-Brossel,  
Paris*

**Hélène Perrin**

*directrice de recherche au CNRS, Laboratoire de physique des lasers,  
Villetaneuse*

Il y a quarante ans, vingt ans après la découverte du laser, les physiciens élaboraient des méthodes de refroidissement par laser pour des ions piégés dans des champs électromagnétiques. Dès les années 1980, ces techniques étaient raffinées et étendues à des atomes, grâce à l'audace et l'inventivité d'une génération de chercheurs pionniers. Il fallait en effet réussir simultanément à piéger et à refroidir les échantillons de gaz atomiques dans le vide à distance de toute paroi. Les résultats spectaculaires se sont enchaînés et des températures extraordinairement basses ont été rapidement atteintes, très proches du zéro absolu. Le domaine dit des *atomes froids* était né, récompensé par des prix Nobel successifs dont le premier fut celui attribué en 1997 à William D. Phillips, Steven Chu et Claude Cohen-Tannoudji. Des échantillons gazeux de quelques milliers à quelques milliards d'atomes peuvent ainsi être préparés à quelques millièmes de degré au-dessus du zéro absolu, ce qui signifie que les particules se déplacent à des vitesses extrêmement faibles, de l'ordre du centimètre par seconde. À ces températures extrêmes, la matière change de comportement et ses propriétés ne peuvent être décrites qu'en faisant appel à la mécanique

quantique et aux propriétés ondulatoires des particules. De nouveaux phénomènes physiques ont été découverts et des innovations ont suivi les progrès théoriques et expérimentaux de la recherche. Imaginés au départ comme une merveilleuse méthode pour perfectionner la physique atomique, les atomes froids se sont progressivement révélés des outils puissants pour la recherche dans des champs transverses de la physique, tels ceux de la matière condensée et même de la physique des hautes énergies. On parle à présent de « gaz quantiques » pour ces atomes à si basse température que leur comportement collectif en est modifié par les lois de la mécanique quantique.

Le domaine des gaz quantiques, qui a fait ses débuts aux États-Unis et en Europe, a connu ensuite un développement spectaculaire dans le monde entier. Aujourd'hui, il continue d'attirer des générations successives d'étudiants parmi les plus brillants de tous les pays. Ce succès qui ne se dément pas tient en partie à la flexibilité des études que permet chaque expérience : on peut faire varier la densité du gaz, sa température, la géométrie des échantillons, la force des interactions entre les particules, etc. Les montages sont certes assez complexes mais restent à taille humaine, permettant à chacun de se former à la maîtrise de beaucoup de techniques. En outre le domaine des gaz quantiques allie en général la théorie à l'expérience, ce qui est un attrait supplémentaire pour le chercheur qui aime appréhender l'ensemble de son sujet.

De nos jours, il en va des atomes froids comme des lasers. D'un côté, ce sont toujours des objets d'étude que la recherche tente de perfectionner : on recule de plus en plus la limite des températures extrêmes au voisinage du zéro absolu, on fait varier les densités de quelques milliards d'atomes par  $\text{cm}^3$  à quelques atomes isolés, on étend la gamme des particules refroidies (atomes, ions, molécules, agrégats, etc.), on miniaturise et on simplifie les dispositifs. D'un autre côté, les gaz quantiques fournissent des outils utilisables pour tenter de comprendre de plus en plus de phénomènes complexes tels que la physique à  $N$ -corps ou le transport quantique, ainsi que pour explorer les fondements conceptuels de la mécanique quantique. Ils participent à ce que l'on nomme la seconde révolution quantique, celle qui résulte de la possibilité d'isoler et visualiser des particules uniques (atomes, ions, photons, etc.), et aussi de mettre en œuvre les phénomènes de l'intrication quantique, concept de base de la mécanique quantique. Les gaz quantiques se trouvent ainsi bien positionnés dans le domaine émergent des technologies quantiques, qui fait actuellement l'objet d'un spectaculaire effort mondial, en particulier en Europe où l'Union européenne déploie depuis 2017 un programme de *flagship* doté de moyens importants.

L'ouvrage présente les développements les plus récents auxquels donne lieu la physique des gaz quantiques. Faisant suite au livre *Les atomes froids* d'Erwan

Jahier publié en 2010 dans la même collection, il retrace l'essor exceptionnel du domaine au cours des dix dernières années. L'ouvrage explore les axes multiples le long desquels ce champ de recherche se déploie, sans viser à une impossible exhaustivité. Chaque chapitre est écrit par un ou plusieurs auteurs, qui sont tous des chercheurs en activité. Ils y décrivent en termes pédagogiques mais précis l'état d'avancement de la recherche dans leur domaine. L'ensemble de l'ouvrage est coordonné par trois chercheurs qui en assurent la cohérence.

Après un bref retour sur la physique de l'interaction des atomes avec la lumière, le premier chapitre décrit la succession des méthodes qui ont permis de produire et de comprendre le refroidissement des gaz dilués jusqu'à des températures extrêmement basses et de piéger ces échantillons gazeux lévitant dans le vide. Ce chapitre raconte aussi cette première très grande percée que fut la mise en évidence expérimentale de la condensation de Bose-Einstein.

Le chapitre 2 est consacré aux avancées très significatives en métrologie de la physique que les systèmes quantiques refroidis ont permises. Les progrès sont constants en ce qui concerne l'exactitude des horloges atomiques dans le domaine micro-onde et ensuite optique, ce qui revêt une importance particulière pour la future définition de la seconde. D'autres types d'instruments à atomes froids tels que les interféromètres arrivent également à maturité. Il en résulte des possibilités nouvelles de sonder les lois fondamentales de la physique.

Le chapitre 3 montre comment le contrôle de plus en plus poussé du refroidissement d'atomes, des états quantiques de la lumière et de l'interaction entre lumière et matière ont trouvé ces dernières années un nouveau terrain d'applications avec les réseaux quantiques d'information. Sont décrites ici les opérations linéaires et non linéaires nécessaires pour le stockage et le traitement de l'information quantique et comment les atomes froids ont permis de développer divers dispositifs efficaces.

Le chapitre 4 détaille les possibilités ouvertes par les gaz quantiques dans le domaine de la simulation quantique. L'objectif est de répondre à des questions posées par la physique de systèmes constitués de nombreux objets quantiques en interaction à l'aide d'un autre système quantique, plus facile à manipuler, tels des atomes froids assemblés dans des réseaux optiques, ou piégés un par un par des pinces optiques et agencés pour former des cristaux artificiels. Les applications concernent par exemple le magnétisme quantique ou la supraconductivité.

Le chapitre 5 traite de la diffusion des ondes et du désordre d'un point de vue théorique. Les atomes froids peuvent jouer le rôle de ces ondes diffusées quand ils sont immergés dans un milieu optique désordonné. Dans le domaine du transport, l'effet du désordre est pris en compte spécifiquement y compris en présence d'interactions entre les particules. Les situations où le désordre rend impossible le retour à l'équilibre sont aussi décrites.

Le chapitre 6 étend aux ions la physique des gaz quantiques refroidis. Les méthodes de piégeage sont différentes de celles des atomes froids mais beaucoup d'applications sont communes : mesures de précision, spectroscopie, études de collision, simulation et information quantiques. Les ions refroidis sont également des outils de choix pour des expériences fondamentales telles que la recherche sur l'antimatière.

Enfin, le chapitre 7 élargit les méthodes de refroidissement à des molécules. On peut obtenir des molécules froides en associant entre eux des atomes froids par diverses méthodes optiques ou magnétiques. Depuis peu se développent également des méthodes alternatives de refroidissement direct de molécules à des températures aussi basses que celles accessibles avec des atomes. Les applications sont variées, allant de la simulation et l'information quantiques au contrôle des réactions chimiques. Les molécules froides ouvrent également la voie à de nouveaux tests de physique fondamentale.

Cet ouvrage dans son ensemble est conçu pour tout public curieux de science et de technologie. Il s'adresse en particulier aux élèves des classes préparatoires et aux étudiants de licence et de master. Il pourra également être utile aux jeunes — et moins jeunes — chercheurs qui abordent le domaine de la physique quantique, et à tous ceux qui s'intéressent aux technologies quantiques, sujet en plein développement. Le livre comporte très peu d'équations, mais beaucoup de figures, croquis et illustrations en couleur qui lui confèrent un abord attrayant et relativement aisé. Il a l'objectif de faire partager à un large public la passion qui anime l'ensemble des auteurs, tous activement engagés dans leurs recherches.



# Coordinateurs, contributeurs, mécènes et remerciements

## Les coordinateurs

Cet ouvrage collectif a été écrit par 19 personnes dont les noms figurent en tête des chapitres et ci-dessous. La coordination en a été assurée par Robin Kaiser, Michèle Leduc et Hélène Perrin.

### Robin Kaiser

Robin Kaiser est directeur de recherche au CNRS. Il a débuté sa carrière en physique atomique à l'École normale supérieure par une thèse dirigée par Alain Aspect, dans le groupe de Claude Cohen-Tannoudji. Il a ensuite effectué un séjour postdoctoral à l'université de Harvard dans le groupe de Gerald Gabrielse, avant de rejoindre, sur un poste de chargé de recherche au CNRS, Alain Aspect pour démarrer une nouvelle activité en atomes froids à l'Institut d'Optique. Depuis 1996, Robin Kaiser dirige l'équipe « Atomes froids » à l'Institut de physique de Nice. Ses travaux de recherche concernent essentiellement la diffusion de lumière, combinant la physique des atomes froids avec celle de la physique mésoscopique, de la localisation de lumière et de l'optique quantique. Il a initié des études de corrélations d'intensité en astrophysique, reprenant ainsi les études historiques de Hanbury



Brown et Twiss avec les outils modernes de l'optique quantique. Il est aussi le directeur du GDR Atomes froids depuis sa création.

### Michèle Leduc

Michèle Leduc est directrice de recherche émérite au CNRS. Sa carrière en physique atomique s'est essentiellement déroulée à l'École normale supérieure à Paris, dans le Laboratoire LKB qui porte le nom de ses fondateurs Alfred Kastler (lauréat du prix Nobel en 1966) et Jean Brossel. En 1993 elle rejoint l'équipe qui travaille sur le refroidissement laser dirigée par Claude Cohen-Tannoudji, lauréat du prix Nobel en 1997. Ses travaux de recherche les plus récents portent sur les condensats de Bose-Einstein d'hélium métastable. Elle coordonne aujourd'hui les activités pour le rayonnement extérieur de SIRTEQ, le réseau de recherche sur les technologies quantiques de la région Île-de-France. Elle est aussi éditrice de collections d'ouvrages de science pour le CNRS et pour EDP-Sciences. Elle assure des missions de réflexion sur l'éthique dans diverses instances telles que le COMETS (Comité d'éthique du CNRS).



### Hélène Perrin

Hélène Perrin est directrice de recherche au CNRS. Après une thèse au Laboratoire Kastler-Brossel sous la direction de Christophe Salomon sur le refroidissement laser d'atomes dans un piège optique et un séjour post-doctoral au CEA sur les gaz d'électrons bidimensionnels avec Christian Glattli, elle a été recrutée au CNRS au sein du Laboratoire de physique des lasers de l'Université Paris-Nord, où elle dirige l'équipe « Condensats de Bose-Einstein ». Sa recherche porte sur les condensats de Bose-Einstein confinés dans des pièges radiofréquences et plus particulièrement sur leurs propriétés superfluides. Elle enseigne à l'École normale supérieure et à l'Université de Paris, et est régulièrement invitée à donner des cours dans des écoles d'été internationales comme l'école des Houches. Elle coordonne avec Pascal Simon l'axe « Simulation quantique » de SIRTEQ et est membre du bureau du GDR « Atomes froids ».



## Les contributeurs

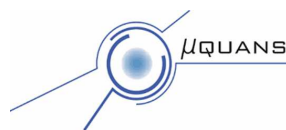
Les personnes suivantes ont contribué à la rédaction de cet ouvrage : Baptiste Allard, Juliette Billy, Nadia Bouloufa-Maafa, Nicolas Cherroret, Daniel Comparat, Olivier Dulieu, Laurent Hilico, Vincent Josse, Robin Kaiser, Martina Knoop, Bruno Laburthe, Thierry Lahaye, Michèle Leduc, Hans Lignier, Jérôme Lodewyck, Franck Pereira dos Santos, Hélène Perrin, Goulven Quémener, Jakob Reichel. Ces contributeurs poursuivent leurs recherches dans des laboratoires associés au CNRS et pour la plupart à diverses institutions universitaires. Les coordinateurs remercient vivement tous ces auteurs pour leur coopération aimable et patiente à cette entreprise collective.

## Les mécènes

Nous remercions vivement les divers mécènes de ce livre, grâce auxquels la production et la diffusion de l'ouvrage se trouvent grandement facilitées.

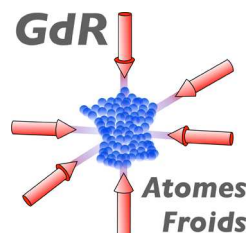
### Muquans

La société Muquans est une PME issue de la recherche académique, créée en 2011 et implantée dans les locaux de l'Institut d'Optique d'Aquitaine. Elle est la première au monde à proposer des solutions industrielles basées sur la manipulation quantique d'atomes froids. Elle a ainsi développé une large gamme de solutions technologiques de très haute performance et se positionne sur différents domaines d'activités : elle propose un gravimètre quantique absolu destiné au monde de la géophysique, une horloge atomique de très haute stabilité et des équipements de transfert de fréquence sur fibre sans équivalents sur le marché de la métrologie temps-fréquence, ou encore des systèmes laser intelligents parfaitement adaptés aux besoins de la physique quantique.



### GDR Atomes froids

Le GdR « Atomes froids » (Groupement de Recherche du CNRS « Atomes froids ») a été créé en 2012. Ce réseau de plus de 20 laboratoires à travers la France coordonne les activités dans le domaine des atomes froids à l'échelle nationale, anime la formation des jeunes doctorants, organise des rencontres et des colloques, distribue des moyens et contribue au rayonnement du domaine.



## LabEx FIRST-TF

Le LabEx FIRST-TF (« Réseau pour la Recherche, l'Innovation, la Formation, les Services et le Transfert en Temps-Fréquence ») est un réseau thématique visant à regrouper tous les acteurs du Temps-Fréquence à l'échelle nationale (20 laboratoires, 27 entreprises, 5 agences techniques et 5 autres structures). Il favorise l'émergence de projets collaboratifs, avec un spectre large d'applications, de la physique fondamentale aux systèmes de positionnement par satellite.



## Remerciements

Nous remercions tout particulièrement Alain Aspect, contributeur majeur aux recherches sur les atomes froids, pour avoir accepté de rédiger une préface passionnante et très documentée qui retrace l'évolution du domaine au cours des dernières décennies.

Les remerciements des auteurs vont aux personnes suivantes : Ennio Arimondo, Hans Bachor, France Citrini, Pierre Cladé, Jean Dalibard, Dominique Delande, Antoine Heidmann, Agnès Henri, Lucile Julien, Michel Le Bellac, Lucie Marignac, Pierre Pillet, Jean-Michel Raimond, Christophe Salomon, Jook Walraven, Christoph Westbrook, Tarik Yefsah.

# Table des matières

Avant-propos	iii
Coordinateurs, contributeurs, mécènes et remerciements	v
Préface	xv
<b>1 Refroidir et piéger les atomes</b>	<b>1</b>
1.1 Quand un atome rencontre un photon . . . . .	2
1.1.1 L'atome ralentit... . . . . .	3
1.1.2 ... la température du gaz s'abaisse . . . . .	5
1.2 Des pièges de toutes sortes pour les atomes . . . . .	7
1.2.1 Avec un laser et des champs magnétiques : le piège à tout faire . . . . .	8
1.2.2 Des pinces optiques pour attraper et immobiliser les atomes	10
1.2.3 Avec des champs magnétiques : pièges de grand volume ou puces à atomes . . . . .	13
1.3 Encore plus froid : le gaz change d'état . . . . .	16
1.3.1 En marche vers le zéro absolu, dernière étape : on évapore .	16
1.3.2 Le Graal enfin, la condensation de Bose-Einstein : les atomes tous comme un seul ! . . . . .	17
1.3.3 Des boîtes à atomes faites de lumière . . . . .	21
1.3.4 Les atomes peuvent s'attirer ou se repousser . . . . .	22
1.4 Et toute la jungle des particules à l'échelle microscopique . . . . .	23
1.4.1 De quoi la matière est-elle faite ? Bosons et fermions . . . . .	23
1.4.2 Les fermions aussi peuvent devenir ultrafroids . . . . .	24
1.5 Conclusion . . . . .	26
<b>2 Instruments à atomes froids et métrologie</b>	<b>27</b>
2.1 Qu'est-ce que la métrologie ? . . . . .	28
2.1.1 Notion d'incertitude statistique et systématique . . . . .	28
2.1.2 Les atomes comme étalons . . . . .	28
2.1.3 Métrologie avec des systèmes quantiques . . . . .	29
2.2 Horloges atomiques . . . . .	30

2.2.1	Principe d'une horloge atomique . . . . .	30
2.2.2	Pourquoi utiliser des atomes froids ? . . . . .	32
2.2.3	Les horloges à atomes froids de césium . . . . .	32
2.2.4	Le piégeage des atomes pour améliorer la précision . . . . .	34
2.2.5	Les horloges optiques et la future définition de la seconde . . . . .	34
2.2.6	Les liens entre les horloges et les échelles de temps . . . . .	36
2.3	Interféromètres atomiques . . . . .	36
2.3.1	Principe d'un interféromètre atomique, similarités et différences avec une horloge au césium . . . . .	36
2.3.2	Capteurs inertiels avec des interféromètres atomiques . . . . .	39
2.3.3	Maturité des instruments et transferts industriels . . . . .	42
2.3.4	Nouvelles architectures . . . . .	43
2.4	Sonder les lois fondamentales de la physique avec des atomes froids . . . . .	44
2.4.1	Gravimétrie et chrono-géodésie . . . . .	45
2.4.2	Relativité générale et ondes gravitationnelles . . . . .	47
2.4.3	Modèle standard et matière noire . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Atomes et photons uniques : échange d'information quantique</b>	<b>51</b>
3.1	Voir un atome unique . . . . .	51
3.2	L'apport des cavités . . . . .	55
3.3	Couplage fort entre un photon et un atome : le doublet de Rabi . . . . .	57
3.4	L'atome comme qubit . . . . .	58
3.5	Des cavités miniaturisées . . . . .	60
3.6	Détecter l'état d'un qubit . . . . .	62
3.7	Stocker de l'information quantique dans des atomes froids : Mémoires quantiques . . . . .	64
3.8	Améliorer les horloges grâce à l'intrication : états comprimés de spin . . . . .	68
<b>4</b>	<b>La simulation quantique avec des atomes froids</b>	<b>75</b>
4.1	Qu'est-ce que la simulation quantique ? . . . . .	76
4.1.1	De la matière classique aux constituants quantiques . . . . .	76
4.1.2	Des difficultés insurmontables pour comprendre les systèmes quantiques complexes ? . . . . .	78
4.2	Atomes ultrafroids et simulation quantique . . . . .	81
4.2.1	Les gaz ultrafroids : des systèmes dilués où surgissent des comportements collectifs complexes . . . . .	81
4.2.2	Pourquoi les atomes froids sont-ils de bons simulateurs quantiques ? . . . . .	84
4.3	Voir un système quantique atome par atome . . . . .	88

4.3.1	Visualiser des atomes dans un réseau optique . . . . .	88
4.3.2	Assembler des cristaux artificiels atome par atome . . . . .	89
4.4	Que peut-on simuler avec des atomes froids ? . . . . .	90
4.4.1	Simuler le magnétisme quantique . . . . .	90
4.4.2	Poursuivre les recherches sur l'origine de la supraconductivité . . . . .	93
4.4.3	Améliorer la compréhension de la physique des matériaux fortement corrélés . . . . .	93
4.4.4	Beaucoup d'autres perspectives . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Ondes et désordre</b>	<b>97</b>
5.1	Ondes et désordre : une physique très riche ! . . . . .	98
5.1.1	La diffusion : une approche intuitive... . . . . .	98
5.1.2	... qui cache une physique bien plus complexe ! . . . . .	99
5.1.3	Une physique source d'innovation . . . . .	99
5.2	Atomes froids : le désordre, oui, mais contrôlé ! . . . . .	100
5.2.1	Comment immerger les atomes dans le désordre ? . . . . .	100
5.2.2	Marche aléatoire d'atomes froids dans le désordre : la diffusion . . . . .	102
5.3	La localisation d'Anderson : stoppé net par le désordre . . . . .	104
5.3.1	60 ans de localisation d'Anderson et toujours des questions . . . . .	104
5.3.2	Comprendre intuitivement la localisation d'Anderson . . . . .	107
5.3.3	La localisation d'Anderson des atomes froids : les premières observations . . . . .	109
5.3.4	Vers l'étude de la transition d'Anderson à 3D . . . . .	111
5.4	La rétro-diffusion cohérente : visualiser les interférences . . . . .	114
5.4.1	La localisation dans l'espace des vitesses . . . . .	114
5.4.2	La rétro-diffusion cohérente des atomes froids . . . . .	115
5.4.3	La localisation d'Anderson dans l'espace des vitesses . . . . .	118
5.5	Atomes froids et désordre : d'autres configurations . . . . .	118
5.5.1	Universalité des phénomènes de localisation . . . . .	118
5.5.2	Diffusion de la lumière par les atomes . . . . .	119
5.5.3	« Frapper » les atomes pour les localiser . . . . .	122
5.6	Interactions et désordre : quand les atomes se parlent . . . . .	125
5.6.1	Phases quantiques des gaz désordonnés à basse température . . . . .	125
5.6.2	La localisation à $N$ -corps : quand le désordre rend impossible le retour à l'équilibre . . . . .	127
5.7	Conclusion . . . . .	129

<b>6 Ions piégés et refroidis</b>	<b>131</b>
6.1 Comment confiner une particule chargée ? . . . . .	133
6.1.1 Le piège de Penning . . . . .	134
6.1.2 Le piège radiofréquence, ou piège de Paul . . . . .	135
6.1.3 Zoologie des pièges . . . . .	137
6.2 Comment refroidir les ions piégés ? . . . . .	139
6.3 Mettons plusieurs ions dans le piège ! . . . . .	142
6.4 Que faire avec des ions piégés ? . . . . .	143
6.4.1 Des mesures de précision : masses, propriétés atomiques, ...	144
6.4.2 Régime de confinement fort et horloges à ions . . . . .	145
6.4.3 Information et simulation quantiques . . . . .	147
6.4.4 Collisions et réactions chimiques froides . . . . .	148
6.4.5 Confiner l'antimatière . . . . .	148
6.5 Conclusion . . . . .	149
<b>7 Refroidir les molécules</b>	<b>151</b>
7.1 Comment caractériser une molécule ? . . . . .	154
7.1.1 Les niveaux d'énergie électroniques, vibrationnels, rotationnels . . . . .	154
7.1.2 Peut-on refroidir des molécules par laser ? . . . . .	156
7.2 Associer des atomes froids . . . . .	159
7.2.1 Avec un photon : la photo-association . . . . .	159
7.2.2 Avec un champ magnétique : la magnéto-association . . . . .	160
7.2.3 Comment contrôler l'association ? . . . . .	161
7.3 Refroidir directement des molécules . . . . .	163
7.3.1 Formation et refroidissement préliminaire . . . . .	164
7.3.2 Décélération des jets moléculaires . . . . .	166
7.3.3 Refroidissement sub-Kelvin . . . . .	168
7.4 Les molécules froides : pour quelles applications ? . . . . .	170
7.4.1 Simulation quantique . . . . .	172
7.4.2 Information quantique . . . . .	174
7.4.3 Chimie moléculaire froide et contrôlée . . . . .	175
7.4.4 Mesures de précision . . . . .	177
7.5 Conclusion . . . . .	179
<b>8 Conclusion et tout ce dont ce livre aurait pu aussi parler . . .</b>	<b>181</b>
<b>Index</b>	<b>193</b>



# Préface

**Alain Aspect**

*directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire Charles Fabry, Palaiseau*

## Préface par Alain Aspect

Alain Aspect est professeur à l'Institut d'Optique Graduate School, professeur à l'École Polytechnique, directeur de recherche émérite au Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique. Médaille d'or du CNRS, il a reçu de nombreux prix internationaux prestigieux. Il est membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies.



## De la mélasse optique à la condensation de Bose-Einstein : quand les limites sont franchies

Quand Michèle, Hélène et Robin m'ont demandé d'écrire une préface pour cet ouvrage, il m'était impossible de refuser, mais j'avais du mal à me lancer dans l'exercice un peu convenu qui consiste à dire un mot positif sur chacun des chapitres, même si leur lecture m'a convaincu de leur exceptionnelle qualité. En fait cette lecture m'a fait prendre conscience que les atomes froids, jadis

uniquement objet de recherche avancée, sont essentiellement devenus aujourd'hui un outil au service de multiples applications dans le champ de la recherche fondamentale et des technologies quantiques, dont cet ouvrage donne un bon échantillon. En pensant aux lecteurs potentiels – grand public cultivé curieux des développements actuels de la science, mais aussi étudiants s'engageant dans un master ou même une thèse utilisant les atomes froids – j'ai pensé qu'il serait dommage qu'ils ignorent l'exaltante aventure qu'a été le développement de cet outil. J'ai donc décidé de partager avec eux quelques souvenirs de l'émergence de ce domaine jusqu'à sa maturité, que j'ai vécue en observateur privilégié depuis le Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure de la rue d'Ulm, puis au Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique.

Voici donc quelques souvenirs personnels des premières années du refroidissement d'atomes par laser et de l'obtention des condensats de Bose-Einstein gazeux, outils de base des magnifiques applications décrites dans cet ouvrage. Il ne s'agit pas d'un travail d'histoire des sciences, mais de la façon dont j'ai vécu cette histoire, ou plus exactement la façon dont je me souviens l'avoir vécue. Elle est biaisée par les lieux d'où je l'ai observée, et surtout par mes propres obsessions : la volonté de ne rien oublier des errements et des déceptions, des bonnes idées et des coups de chance, en les replaçant dans le contexte de l'évolution des grands concepts de la physique : j'ai l'espoir – naïf sans doute – que cela pourrait être une leçon utile pour les jeunes physiciens qui débutent dans le domaine, et que cela peut intéresser les « amateurs curieux » qui ne doivent pas croire que la découverte scientifique est un long fleuve tranquille. Pendant cette quinzaine d'année, de 1985 à 2000, plusieurs barrières considérées un temps comme des limites ultimes ont été franchies ou plutôt contournées, et la leçon s'impose : il ne faut pas se laisser arrêter par les théorèmes d'impossibilité. Il faut trouver un moyen de se placer dans les situations où ces théorèmes ne s'appliquent pas, par la réflexion théorique ou, plus souvent, par l'expérience, en laissant la nature montrer la voie à qui sait la voir. Il ne faut pas sous-estimer le rôle de la chance que les anglo-saxons appellent « sérendipité », celle qui fait que l'on trouve mieux que ce qu'on cherchait.

Les années 1985–1988 furent extraordinaires. À l'automne 1985, l'équipe « atomes froids » du Laboratoire Kastler-Brossel que Claude Cohen-Tannoudji<sup>1</sup> avait constituée autour de lui – les trois mousquetaires Jean

---

<sup>1</sup> Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William Phillips ont reçu le prix Nobel 1997 pour leurs travaux sur le refroidissement et le piégeage d'atomes par laser. Voir leurs intéressantes conférences Nobel :

- Chu S. (1998) The manipulation of neutral particles, *Rev Mod Phys* 70(3), 685 ;
- Cohen-Tannoudji C.N. (1998) Manipulating atoms with photons, *Rev. Mod. Phys.* 70(3), 707 ;
- Phillips W.D. (1998) Laser cooling and trapping of neutral atoms, *Rev. Mod. Phys.* 70(3), 721.

Dalibard, Christophe Salomon et moi – était à pied d’œuvre. Notre premier appareil était bien modeste comparé aux extraordinaires montages d’aujourd’hui : un jet atomique de césium, une diode laser pour agir sur la distribution transverse des atomes, et un fil chaud pour analyser le profil du jet après deux mètres de propagation – tracé point par point, à la main, sur papier millimétré ; c’était Claude qui en était chargé quand il passait du temps avec nous au labo. Nous mettions en évidence une « mélasse bleue », un mécanisme nouveau de refroidissement des atomes avec des lasers décalés de la résonance atomique du côté des courtes longueurs d’onde<sup>2</sup>. L’idée était née de l’utilisation par Jean et Claude du modèle de l’atome habillé afin de comprendre l’une des deux forces radiatives<sup>3</sup>, la force dipolaire ; avec le recul, c’était le précurseur de ce que nous appellerons plus tard « effet Sisyphe ». C’est alors qu’éclata une nouvelle retentissante : l’équipe des Bell labs de Steven Chu, Art Ashkin et leurs collègues avait réussi à garder des atomes « englués » pendant une fraction de seconde à l’intersection de trois paires de lasers désaccordés vers « le rouge », à une fréquence inférieure à la fréquence de résonance atomique.

L’idée avait été proposée dix ans plus tôt par Ted Hänsch et Art Schawlow : elle reposait sur la variation avec la vitesse de la force de pression résonnante<sup>3</sup>, l’autre force radiative, et s’appelait donc « refroidissement Doppler ». Avec six ondes convergeant sur les atomes, désaccordées à une fréquence inférieure à la résonance atomique, on s’attendait à ce que tout mouvement de l’atome le conduise à ressentir une force s’opposant au mouvement, l’onde lui faisant face ayant une fréquence apparente se rapprochant de résonance, à cause de l’effet Doppler. Le résultat annoncé par les physiciens des Bell labs<sup>4</sup> était sensationnel : les atomes restaient observables à l’intersection des faisceaux lasers pendant près d’une seconde, soit six ordres de grandeur de plus que les temps habituels d’observation d’atomes se déplaçant à des centaines de mètres par seconde à température ambiante. La température mesurée était annoncée compatible avec la prévision théorique, une valeur de 240 microkelvin, bien en dessous de celles de la plupart des cryostats existant. Ainsi était atteint le premier objectif majeur des équipes engagées dans ce domaine en émergence, celles de Bill Phillips<sup>1</sup> (avec Hal Metcalf), Jan Hall, Steven Chu<sup>1</sup> et Arthur Ashkin<sup>5</sup>, Dave Pritchard,

---

<sup>2</sup> Aspect A., Dalibard J., Heidmann A., Salomon C., Cohen-Tannoudji C. (1986) Cooling atoms with stimulated-emission, *Phys. Rev. Lett.* **57**(14), 1688.

<sup>3</sup> Pour approfondir les notions utilisées dans cette préface, le lecteur pourra se reporter au chapitre 1 de l’ouvrage.

<sup>4</sup> Chu S., Hollberg L., Bjorkholm J.E., Cable A., Ashkin A. (1985) 3-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure, *Phys Rev Lett* **55**(1), 48.

<sup>5</sup> Prix Nobel 2018 pour ses travaux pionniers dans le domaine de la manipulation par laser de micro-sphères diélectriques et d’objets biologiques.

ainsi que celle de Vladilen Lethokhov, auteur de propositions pionnières des années plus tôt, mais qui manquait de moyens expérimentaux à la fin de l'ère soviétique.

Le deuxième grand objectif était le piégeage d'atomes neutres. Dès 1985, l'équipe de Bill Phillips avait réussi à piéger des atomes de sodium « arrêtés » au bout de son ralentisseur Zeeman, dans un minimum de champ magnétique<sup>6</sup>. La méthode de piégeage par champ magnétique n'était valable que pour des atomes paramagnétiques, et le piégeage par laser restait un objectif majeur.

La mélasse optique n'est pas un piège : les atomes y sont « englués » par une force visqueuse (proportionnelle à la vitesse avec un coefficient négatif) incroyablement intense (d'où le terme « mélasse »), mais ils finissent néanmoins par diffuser hors du volume d'action des faisceaux laser, faute de force de rappel vers le centre du piège. Une controverse théorique mettait aux prises les théoriciens sur la possibilité d'un piégeage d'atomes neutres avec de la lumière. Un article célèbre de J.P. Gordon et A. Ashkin avait affirmé l'impossibilité d'y parvenir avec la force de pression de radiation résonante<sup>7</sup>. Ils avaient énoncé pour cette force un théorème baptisé « théorème d'Earnshaw optique », équivalent de l'impossibilité de piéger une charge électrique avec des champs électrostatiques, connue dans la littérature anglophone sous le nom de théorème d'Earnshaw (notre « théorème de Gauss »). On envisageait donc plutôt un piégeage par force dipolaire, qui fournissait un authentique potentiel piégeant autour d'un maximum d'intensité d'un laser désaccordé vers le rouge. Malheureusement, les calculs montraient que les fluctuations inévitables de cette force de piégeage, liées aux photons d'émission spontanée, chaufferaient les atomes qui seraient rapidement éjectés du puits de potentiel. Les solutions les plus sophistiquées étaient imaginées pour surmonter la difficulté, mais c'est la plus simple d'entre elles, mentionnée dans un article théorique de Claude, Jean et Serge Reynaud<sup>8</sup>, dont l'efficacité allait être démontrée expérimentalement dès 1986 par le groupe de Chu et Ashkin<sup>9</sup> : en alternant rapidement les phases de piégeage et de refroidissement par pression de radiation, on moyennait dans le temps les deux effets, et on obtenait à la fois un potentiel moyen piégeant empêchant les atomes de s'échapper et un refroidissement moyen suffisant pour compenser le chauffage.

---

<sup>6</sup> Migdall A.L., Prodan J.V., Phillips W.D., Bergeman T.H., Metcalf H.J. (1985) 1st observation of magnetically trapped neutral atoms, *Phys. Rev. Lett.* **54**(24), 2596.

<sup>7</sup> Ashkin A. Gordon J.P. (1983) Stability of radiation-pressure particle traps – An optical Earnshaw theorem, *Opt Lett* **8**(10), 511.

<sup>8</sup> Dalibard J., Reynaud S., Cohen-Tannoudji C. (1983) Proposals of stable optical traps for neutral atoms, *Opt Commun* **47**(6), 395.

<sup>9</sup> Chu S., Bjorkholm J.E., Ashkin A., Cable A. (1986) Experimental observation of optically trapped atoms, *Phys Rev Lett* **57**(3), 314.

Entropie xxi  
Étoile à neutrons 87, 96  
Évolution temporelle 41, 94  
Exactitude 46

## F

Fabry-Perot 60, 61, 63, 65, 183  
Fermion 1, 77, 186  
Ferromagnétisme 186  
Feschbach 23, 86, 125, 161, 187  
Fibre optique 49, 60-62, 64-67  
Fluctuations quantiques 44  
Fluorescence 13, 35, 40, 52,  
72, 88, 103, 140  
Fréquence de résonance xviii, 6, 57,  
63, 71

## G

GPS 36, 45  
Gravimètre 40  
Gyromètres ix, 39-43, 46

## H

Harmonique 143, 144, 146  
Hertz 62, 71  
Holographie 90  
Horloge ix, 30, 34, 45, 69, 146, 184

## I

Imagerie 44, 99  
Impulsion 32, 37-39, 41, 162  
Inégalités de Bell 187  
Inégalités de Heisenberg 76, 82, 114,  
126  
Infrarouge 11  
Interaction dipolaire 88, 171, 172

Interférence 82, 98  
Interféromètre v, 27, 36, 185

## J

Jet moléculaire 166

## K

Kastler 182

## L

Localisation à  $N$ -corps 100, 127,  
128, 187  
Localisation d'Anderson 97, 106-110,  
121, 123, 187  
Lorentz 132

## M

Magnéto-association 161-163  
Magnéto optique 182  
Marche aléatoire 98  
Masse inertielle 36, 39, 41  
Mélasse 6, 8, 32, 33  
Mémoire 59, 64-68, 185, 188  
Métrologie ix, v, 28, 36, 68, 73, 184  
Modulateur acousto-optique 22, 100,  
101  
Moment dipolaire 88, 152, 171, 173,  
177, 178, 180, 185  
MOT (piège magnéto optique) 152, 171  
Mott 91, 99, 126

## N

Niveaux d'énergie 2, 145, 146, 151, 179

## O

Ondes acoustiques 98  
Ondes gravitationnelles 45, 47, 191  
Orbitales 86  
Oscillateur 30, 58, 143, 144, 146

## P

Pauli 24, 25, 77, 82  
Pertes 13, 55, 62, 90, 162, 170  
PHARAO 47  
Phase 36, 66, 79, 95, 105, 145, 174  
Phase MBL 128  
Phillips iii, 6, 7  
Photo-association 159-161  
Photon balistique 20, 32, 43, 103  
Piège, piégeage xxi, 10  
Plasma 149  
Pointé 60-62, 77, 89, 93  
Polarisation 8, 12, 64, 169, 179  
Polariton 191  
Pompage 161, 182, 183  
Pression de radiation 5, 11, 158  
Principe d'incertitude 126  
Principe d'équivalence 42, 46, 189  
Processus étant réversible 167

## Q

QED, Quantum Electro Dynamics 184  
QCD 184  
Qubit 58, 62, 147, 174, 186

## R

Ralentisseur 5, 6, 9, 166  
Référentiel 5  
Relativité 45, 47, 49, 189  
Rendement 100

Réseau optique 21, 37, 72, 88, 125, 172  
Rétrodiffusion 187  
Rotation 27, 142, 153  
Rydberg 88, 170, 186

## S

Saturation 182  
Séparatrice 37, 39, 41, 44, 45  
Seuil 88  
Simultanée 20, 49  
Sisyphes xvii, xx, xxi, xxv, 169, 170, 182  
Spin électronique 155, 156  
Spin nucléaire 156, 174, 175  
Stockage v, 64, 80, 132, 174  
Supersolides 174, 190  
Supraconductivité v, 78-80, 174  
Symétrie 57, 96, 152  
Sympathique (refroidissement) 24, 141, 145, 170, 184

## T

Télécommunication 11, 68  
Temps universel 33  
Thorium 178, 184  
Transfert ix, 2, 42, 139, 158  
Transition atomique 11  
Transition de phase 17, 91, 104, 126  
Trou noir 48

## U

Univers 49, 80  
UTC 33, 36

## V

Vibrations 20, 40, 41, 48, 143  
Vitesse de recul 37