

JEAN-FRANÇOIS DARS
ANNE PAPILLAULT

PRÉFACE DE
CLAUDE COHEN-TANNOUDJI

AU CŒUR DES ATOMES FROIDS L'AVENTURE DE L'IFRAF



Au cœur des atomes froids

L'aventure de l'IFRAF

Ce livre a été publié à l'initiative de
l'Institut francilien de recherche sur les atomes froids
avec un financement de la Région Île-de-France.

Il a bénéficié d'un soutien du laboratoire Kastler Brossel
et de la Fondation Paris Sciences & Lettres.

Photographies © Jean-François Dars
Maquette : Anne Papillault
Textes © IFRAF

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

© Éditions Rue d'Ulm/Presses de l'École normale supérieure, 2014
45, rue d'Ulm – 75230 Paris cedex 05
www.presses.ens.fr

ISBN 978-2-7288-0524-2

Jean-François Dars et Anne Papillault

Au cœur des atomes froids

L'aventure de l'IFRAF

Préface de Claude Cohen-Tannoudji

avec le concours de Michèle Leduc et Bruno Laburthe-Tolra

ÉDITIONS RUED'ULM

Préface

J'ai eu la chance, dans mon parcours de chercheur, de vivre deux grandes aventures. Tout d'abord l'aventure du pompage optique, quand j'étais élève à l'École normale supérieure et que j'effectuais mon diplôme d'études supérieures et ma thèse de doctorat sous la direction d'Alfred Kastler et de Jean Brossel. Je découvris là un monde nouveau pour moi, celui de la recherche, avec des maîtres exceptionnels qui consacraient tout leur temps aux jeunes chercheurs du laboratoire, les initiant aux techniques expérimentales, leur apprenant à critiquer un résultat, à évaluer un ordre de grandeur, à formuler une hypothèse, à la tester. Les méthodes optiques de la résonance magnétique, comme la double résonance et le pompage optique, venaient d'être découvertes et se révélaient extraordinairement fécondes, ouvrant sans cesse de nouvelles perspectives.

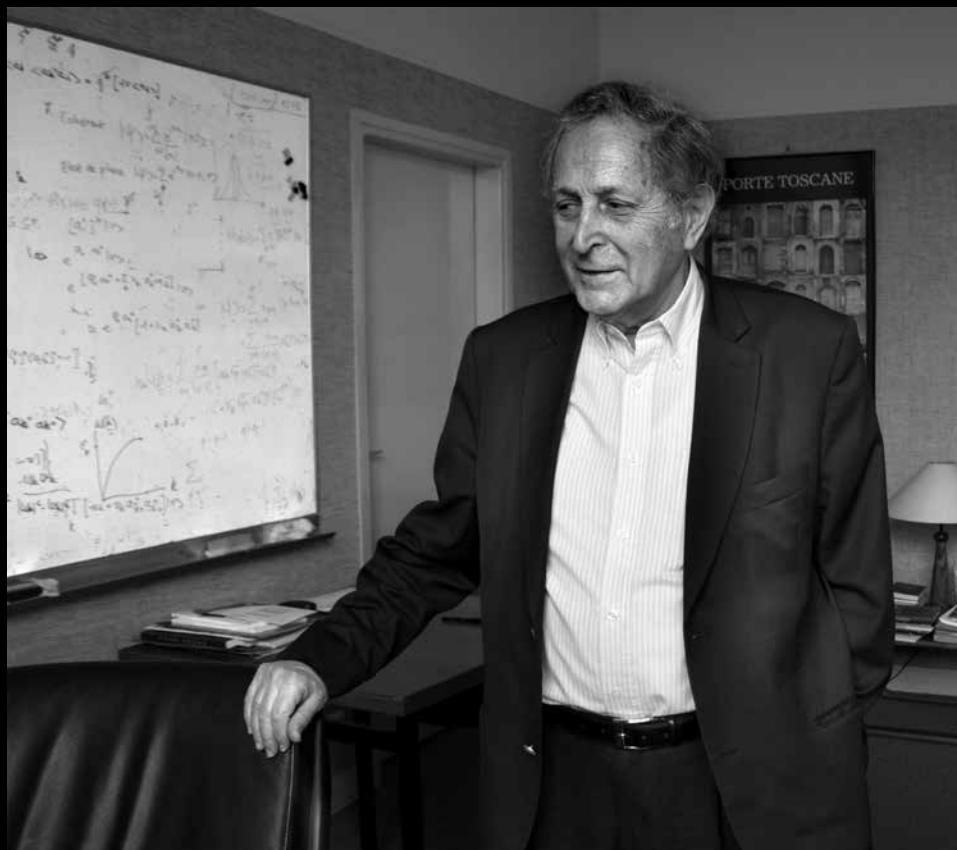
Près de trente ans plus tard, une seconde aventure passionnante allait commencer dans le même laboratoire, celle des atomes froids. Au début, très peu de groupes dans le monde travaillaient sur ce sujet. Il s'agissait alors de comprendre comment la lumière pouvait exercer

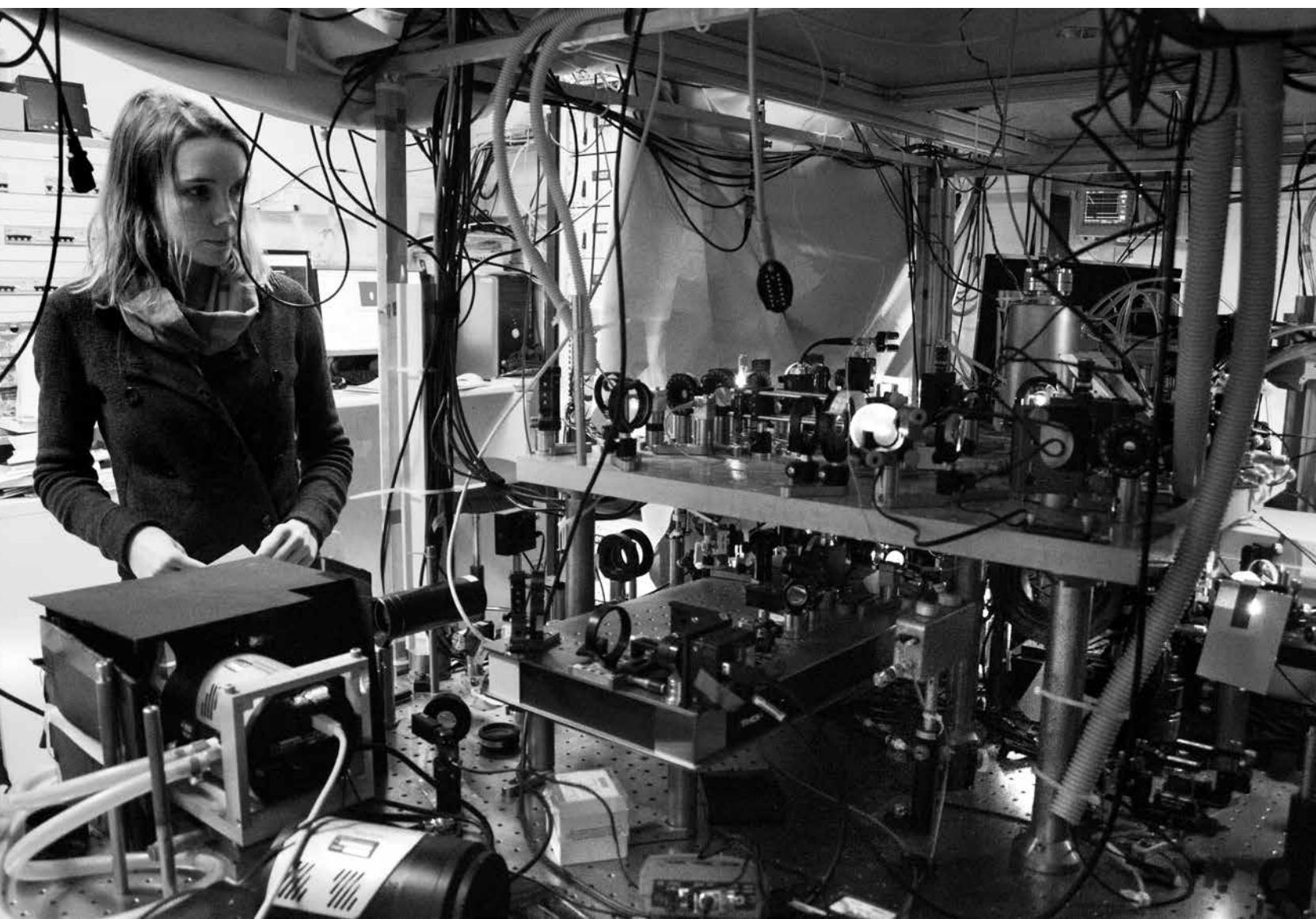
des forces sur les atomes, d'étudier les limites qu'introduisaient les fluctuations quantiques de ces forces. Notre groupe, au Laboratoire Kastler Brossel, ne comportait que deux étudiants en thèse et quatre chercheurs, Alain Aspect, Jean Dalibard, Christophe Salomon et moi-même, et quelques visiteurs étrangers. Puis il est apparu que les mécanismes de refroidissement étaient plus efficaces que prévu, que des effets étudiés plusieurs années auparavant, comme les déplacements lumineux ou les résonances noires, pouvaient jouer un rôle important. Quelques années plus tard, la condensation de Bose-Einstein était observée dans des gaz de rubidium, de sodium et de césum.

Le domaine de recherche connaissait alors un développement spectaculaire. Aux États-Unis, un nouvel institut était créé, le CUA (« Center of Ultracold Atoms »), fédérant les efforts des chercheurs de Harvard et du MIT travaillant sur ce domaine. Il était tentant d'essayer de créer une structure analogue dans la région Île-de-France, où plusieurs équipes s'étaient mises à travailler sur ces sujets. Hubert Curien, alors président du conseil scienti-

fique de la Région, avait parfaitement compris l'importance des enjeux. Il m'avait invité à faire un exposé devant le conseil scientifique et l'avait convaincu de créer l'IFRAF. Cette structure, dirigée par Michèle Leduc, dont nous apprécions tous l'engagement et l'énergie, a joué un rôle décisif pour fédérer les efforts des nombreux jeunes chercheurs qui travaillent aujourd'hui en France sur les atomes froids et créer une véritable communauté. On trouvera dans ce livre les photos de nombre de ces jeunes chercheurs. Plus que des grands discours, l'enthousiasme qui émane de ces images et des témoignages qui les accompagnent suffit à montrer le rôle qu'a joué l'IFRAF pour structurer et fédérer une communauté aussi dynamique.

Claude Cohen-Tannoudji





Les paradoxes du froid

Les atomes froids sont un lieu de paradoxes. À la base de cette recherche, on trouve l'idée qu'un faisceau laser, qui nous brûlerait le doigt si on avait l'imprudence d'y toucher, piège des particules à une température un milliard de fois plus basse que la température ordinaire.

Un deuxième paradoxe est que ce froid extrême, loin de constituer un banal repos éternel, ouvre au contraire les portes d'un riche univers quantique, où ondes et corpuscules jouent une partition commune. Et enfin il y a la surprise, pour le visiteur non averti, de voir que cette musique subtile peut naître dans des manips envahies par un fouillis de câbles et de tuyaux, sur des tables optiques couvertes de composants disposés sans logique apparente.

Les voies de recherche que nous explorons prolongent cet aspect paradoxal des gaz ultrafroids. Nous souhaitons simuler avec nos atomes des phénomènes liés au magnétisme intense, qu'il soit orbital ou de spin, alors que nos atomes n'ont pas de charge électrique et ne portent qu'un faible moment magnétique...

Laboratoire Kastler Brossel
Jérôme Beugnon
Claude Cohen-Tannoudji
Jean Dalibard
Fabrice Gerbier
Michèle Leduc
Sylvain Nascimbène



Laboratoire Kastler Brossel

Jérôme Beugnon

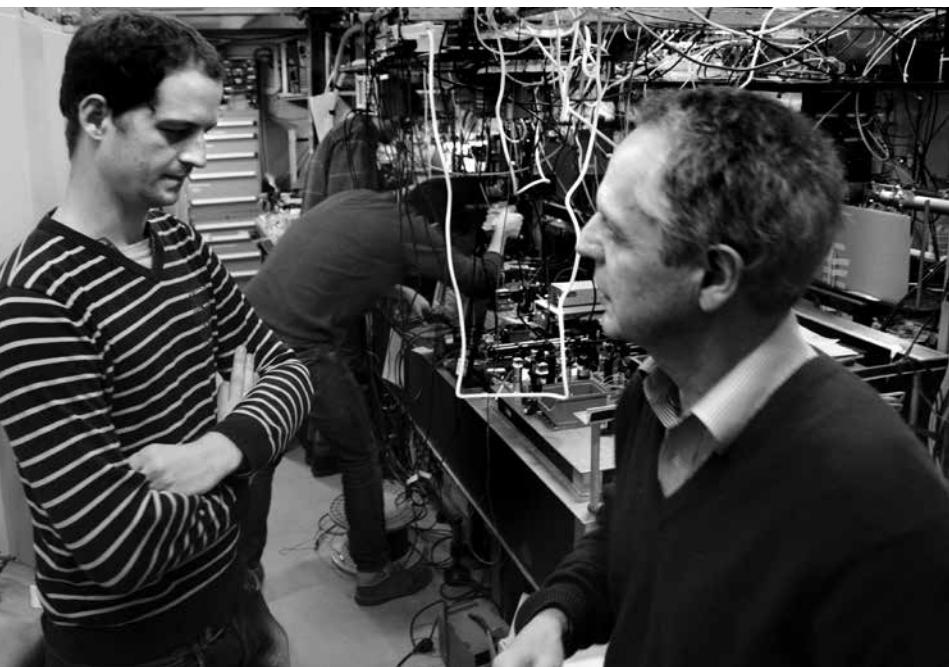
Claude Cohen-Tannoudji

Jean Dalibard

Fabrice Gerbier

Michèle Leduc

Sylvain Nascimbène



La particule de Majorana

Le dysprosium est un atome présentant un arrangement original des électrons autour de son noyau. En excitant ces électrons de manière contrôlée au moyen de faisceaux laser, nous pouvons modifier la façon dont les atomes se déplacent : la vitesse de l'atome est alors reliée à l'état de ses électrons.

Ces atomes manipulés par laser devraient former des nouvelles phases de la matière. Nous cherchons à créer un gaz d'atomes superfluide dans lequel certains atomes s'associeraient pour former une particule appelée « état lié de Majorana ». Les particules de Majorana, contrairement à toutes les particules connues, n'entrent dans aucune des deux catégories habituelles, les bosons et les fermions. Nous chercherons à mettre en évidence cette propriété exotique des particules de Majorana.



Équations d'état



Une des spécialités du groupe gaz de Fermi est l'étude quantitative des propriétés thermodynamiques des gaz quantiques fortement corrélés. Nous avons développé une méthode expérimentale fondée sur l'analyse d'images *in situ* des nuages d'atomes qui donne accès à l'équation d'état du gaz.

Pour les fermions en interaction attractive, l'équation d'état révèle clairement l'existence de la phase superfluide avec une transition de phase du premier ou du second ordre, suivant que le spin des fermions est fortement ou faiblement polarisé.

Nous avons également étudié le gaz de Bose en interaction résonante et révélé des corrections quantiques dites de Lee-Huang-Yang, qui avaient été calculées pour la première fois il y a plus de cinquante ans mais jamais observées auparavant.

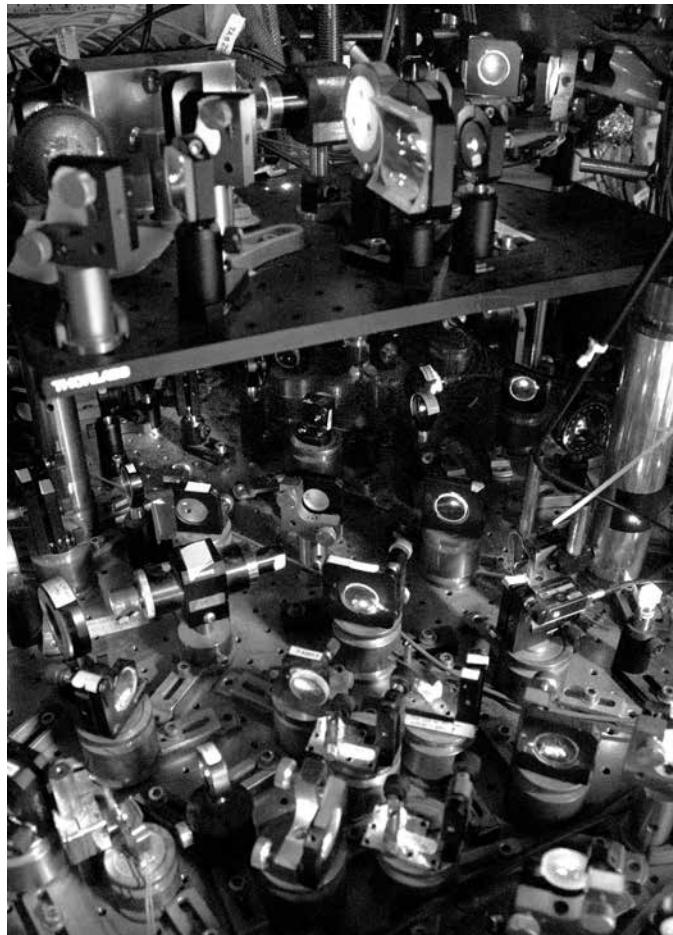




Espaces mixtes

Le groupe fermions ultrafroids a récemment développé une expérience de nouvelle génération qui produit des mélanges de gaz quantiques fermioniques qui donnent accès à de nouvelles situations physiques aussi bien en physique à petit nombre de corps qu'en physique à N corps. Ce dispositif se fonde sur le piégeage et le refroidissement d'atomes de lithium 6 et de potassium 40, des atomes dont les résonances sont suffisamment éloignées pour permettre leur manipulation indépendante par des potentiels lumineux.

Nous cherchons en particulier à explorer le diagramme de phase de fermions en dimensions mixtes où l'une des espèces évolue dans l'espace ordinaire (dimension 3) alors que l'autre espèce évolue à 2, 1 ou 0 dimensions.



Laboratoire Kastler Brossel

Jérôme Estève

Jean Hare

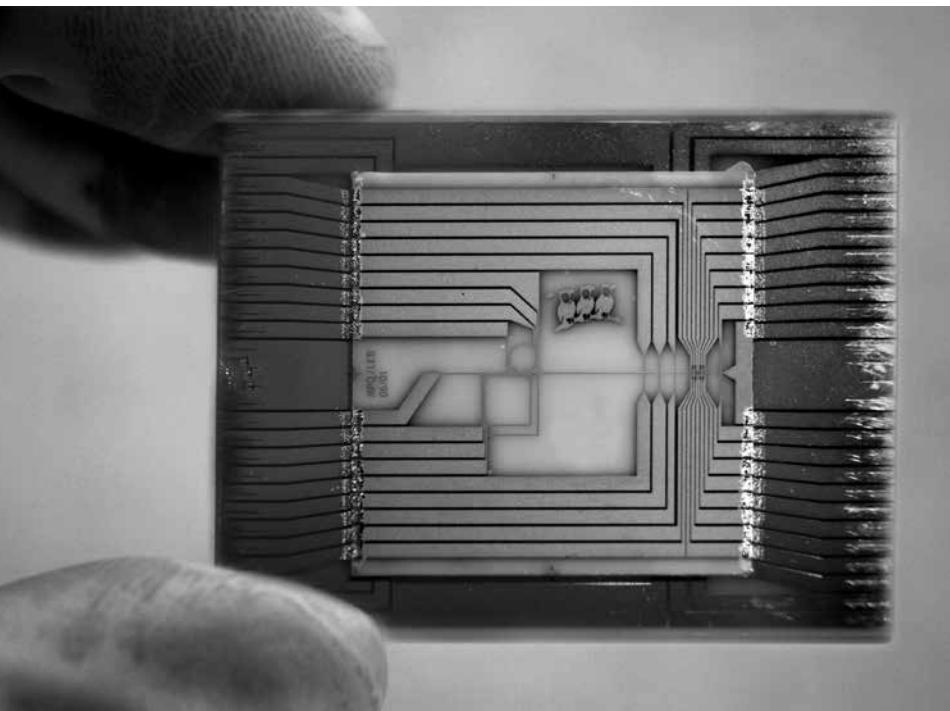
Romain Long

Jakob Reichel

Puces savantes

Les « puces à atomes » réunissent deux champs de recherche parmi les plus actifs de la physique expérimentale actuelle : les gaz quantiques et les nanotechnologies. L'idée générale des puces à atomes est de faire appel aux nanostructures (électroniques, optiques ou autres) pour piéger et manipuler des gaz d'atomes ultrafroids. Il en résulte des systèmes aux propriétés nouvelles et prometteuses, d'un intérêt à la fois fondamental et technologique.

Sur nos puces, nous piégeons désormais non seulement les atomes, mais aussi la lumière. Pour y parvenir, nous avons développé une nouvelle technologie, les cavités Fabry-Pérot à base de fibre optique. Ainsi, nous disposons désormais d'un véritable laboratoire quantique sur puce qui ouvre de nouvelles perspectives de recherche. Nous utilisons par exemple les photons piégés dans la cavité pour préparer de nouveaux états intriqués du gaz d'atomes. Ces états ont des propriétés étonnantes et potentiellement utiles, notamment pour améliorer la mesure du temps et les systèmes de navigation.





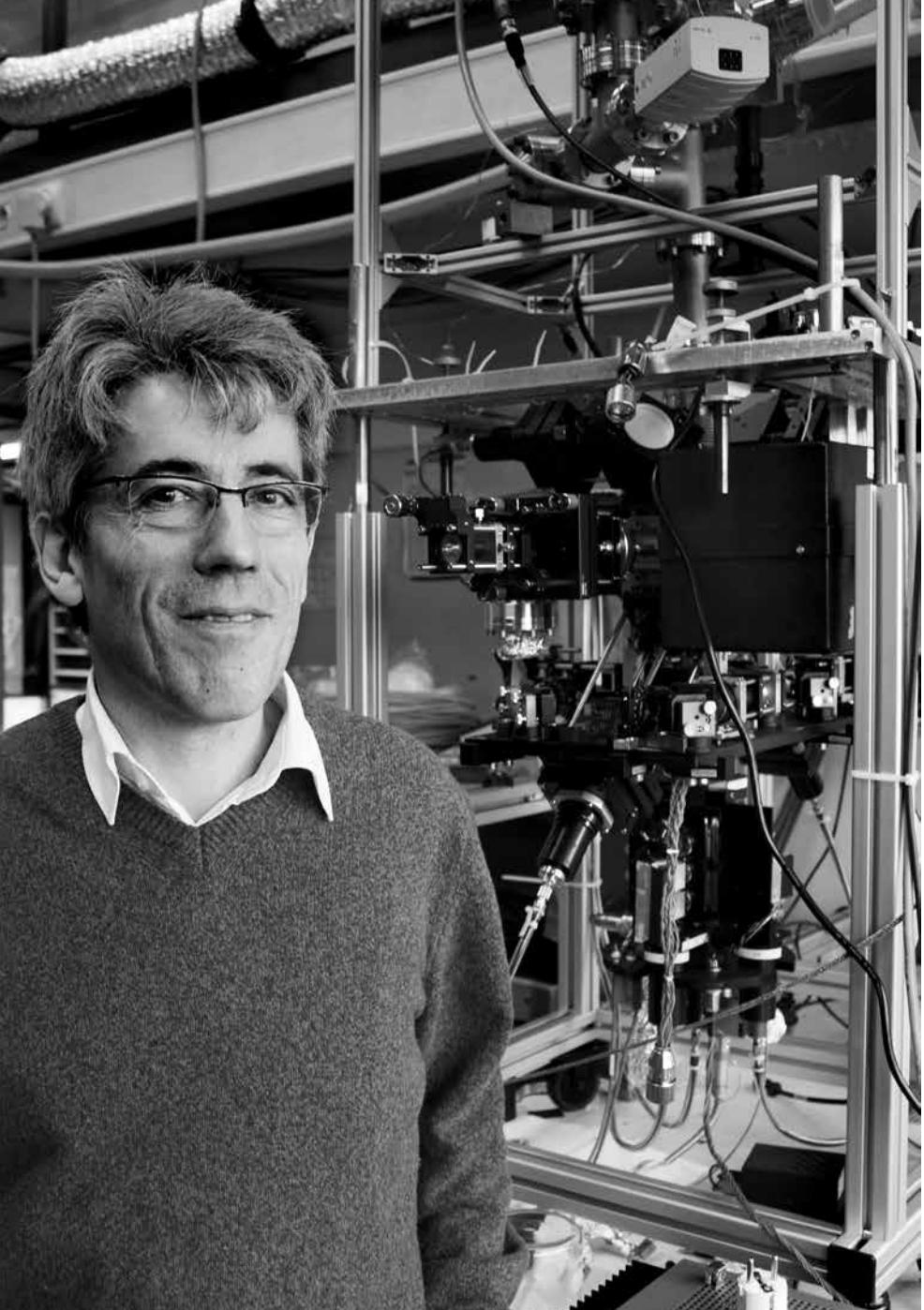
États intriqués et gaz quantiques



Une manifestation remarquable des propriétés quantiques des gaz atomiques à très basse température est la condensation de Bose-Einstein, dans laquelle un nombre macroscopique d'atomes partagent la même fonction d'onde. Notre groupe théorique s'intéresse aux propriétés de cohérence de ces condensats, qui sont pour la matière ce qu'est le laser pour la lumière. En particulier, nous étudions le cas où le condensat est composé de paires d'atomes fermioniques, comme pour les électrons appariés dans un supraconducteur.

Un autre sujet qui nous tient à cœur, plus directement lié aux applications, est l'utilisation des atomes froids pour la création d'états intriqués potentiellement utiles en métrologie. Un exemple en est les états comprimés de spin, récemment obtenus avec des condensats de Bose-Einstein bimodaux et qui pourraient permettre d'augmenter la précision des horloges atomiques.





Photons en cavité

Laboratoire Kastler Brossel
Michel Brune
Igor Dotsenko
Sébastien Gleyzes
Serge Haroche
Jean-Michel Raimond

Des miroirs supraconducteurs permettent de réaliser une « boîte à photons » pratiquement parfaite pour piéger des photons microonde. Les atomes de Rydberg sont des sondes extrêmement sensibles permettant par exemple de voir et revoir un même photon piégé, sans le détruire.

On peut réaliser ainsi certaines des expériences de pensée introduites par les fondateurs de la physique quantique pour illustrer ses aspects les plus étranges. On peut par exemple explorer la frontière entre un monde quantique où le fameux chat de Schrödinger pourrait être à la fois mort et vif et le monde des objets classiques qui nous entourent.

C'est en utilisant des atomes de Rydberg ultrafroids, qui interagissent très longtemps avec les photons de la cavité, que nous comptons poursuivre ces expériences.



Pas de frontières



Quand les gaz quantiques rejoignent les nanotechnologies...

On sait aujourd'hui piéger la lumière dans des cavités de haute finesse entre deux fibres optiques terminées par des miroirs très bien polis. Dans le même espace on peut en outre piéger des atomes, ou encore des systèmes quantiques solides. De petits nuages d'atomes froids peuvent ainsi être transférés dans de telles cavités minuscules à partir d'une puce à atomes où des fils parcourus par un courant créent les champs piégeant. On prépare ainsi des états atomiques intriqués, ce qui ouvre des perspectives attrayantes pour les communications quantiques et la métrologie.

Le nanomonde fait rêver à des applications des atomes froids encore insoupçonnées.

Michèle Leduc

Lorsque la Région Île-de-France nous a fortement conseillé de nous marier, « nanos » du C’Nano IdF avec « atomes froids » de l’IFRAF en vue d’une nouvelle labellisation comme Domaine d’intérêt majeur (DIM), la tâche semblait compliquée...



Le C’Nano IdF et l’IFRAF reposaient sur des structures déjà bien établies depuis plusieurs années, avec des périmètres et un mode

de fonctionnement assez différents les uns des autres. Presque un facteur dix en nombre de chercheurs dans nos réseaux respectifs et des thématiques de l’IFRAF très centrées sur la physique et ses applications technologiques, alors que celles du C’Nano IdF couvrent un vaste champ pluridisciplinaire allant de la chimie aux sciences humaines, en passant par la biologie. Néanmoins, une fois passée la période un peu tendue des négociations entre nous pour la mise en place d’une gouvernance commune, l’exercice de rapprochement s’est révélé fructueux. Nous avons appris à nous connaître et à nous apprécier en moins de deux ans. Désormais la confiance mutuelle est de règle et nous avons même nombre de projets interdisciplinaires en commun. Par exemple, comment piéger des atomes froids sur une puce de taille nanométrique, comment coupler un piège d’atomes froids à une nano-membrane mécanique, comment faire de la chimie avec des atomes froids, etc.

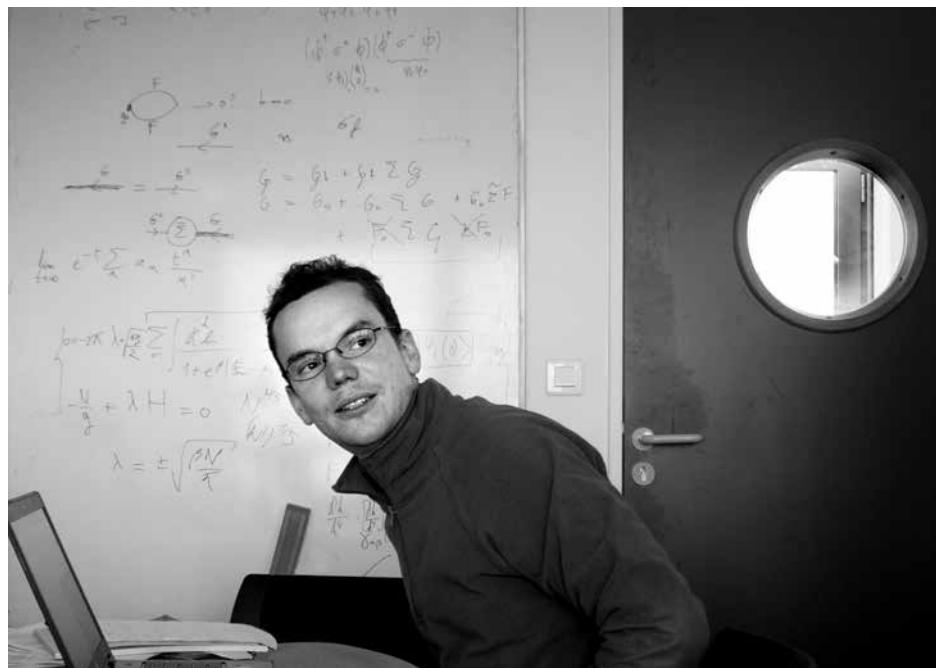
Sylvie Rousset



La limite unitaire

L'un des aspects les plus originaux des atomes froids, le plus fascinant peut-être, est la possibilité d'accéder en laboratoire au régime d'interaction maximale en phase gazeuse, la fameuse *limite unitaire*: la taille effective des atomes lors d'une collision à vitesse arbitrairement faible y est virtuellement infinie, bien plus grande en tout cas que la portée de leur interaction de van der Waals et que la distance typique entre atomes.

Notre équipe de théoriciens explore les perspectives nouvelles offertes par ces systèmes et cherche à en relever tous les défis. De nouveaux effets sont à l'œuvre, donnant naissance à un nombre infini d'états liés à trois corps, ou même à quatre corps comme nous l'avons prédit récemment, ce qui est fort surprenant pour une interaction à courte portée. De nouvelles approches sont à développer, comme la méthode de Monte-Carlo diagrammatique qui échantillonne par ordinateur un très grand nombre de termes de la série perturbative, c'est-à-dire de diagrammes de Feynman, et que nous avons confrontée avec succès aux expériences.



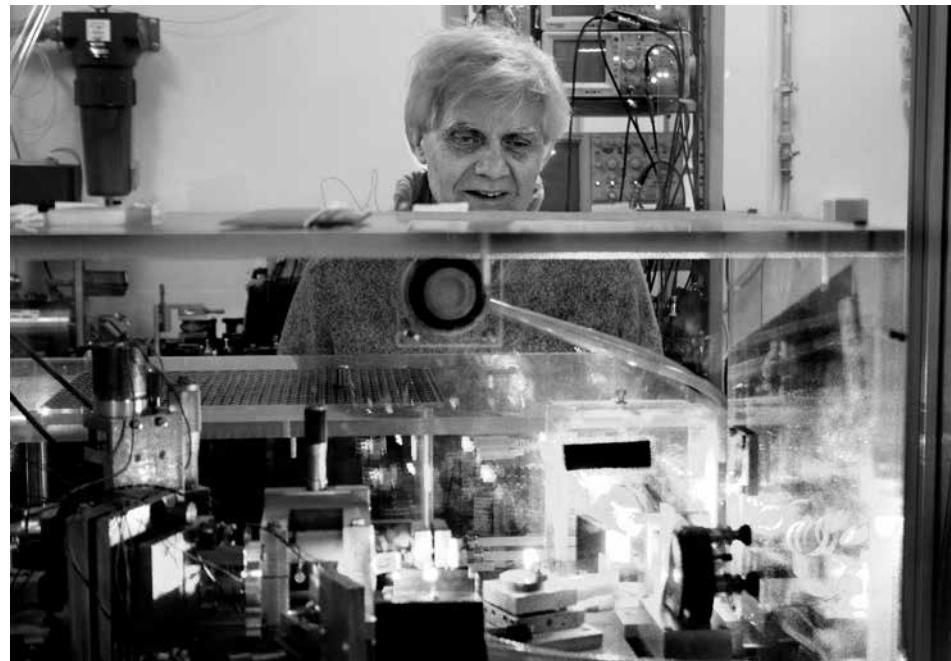


Laboratoire Kastler Brossel
François Biraben
Pierre Cladé
Saïda Guellati-Khélifa
Lucile Julien
François Nez

Tester l'électrodynamique

Notre équipe réalise des mesures de haute précision (spectroscopie de l'hydrogène, mesure du déplacement de Lamb dans l'hydrogène muonique, détermination de la constante de structure fine) pour des tests précis de l'électrodynamique quantique (QED) en comparant expérience et théorie et aussi pour l'ajustement des constantes physiques fondamentales orchestré par le CODATA (The Committee on Data for Science and Technology).

Pour la détermination de la constante de structure fine, le principe consiste à mesurer la vitesse à laquelle recule un atome de rubidium lorsqu'il absorbe un photon ou, plus précisément, comment celui-ci recule lorsqu'il absorbe et renvoie successivement mille photons identiques d'énergie parfaitement déterminée. Nous avons mesuré ce changement de vitesse, de l'ordre de 6 m/s avec une précision de 6 nm/s. Nous avons déterminé la constante de structure fine avec plus de 9 chiffres significatifs, puis comparé cette valeur à une autre mesure reposant sur l'étude d'une propriété physique de l'électron, (son « moment anormal »), mesuré par un autre groupe. L'accord à mieux d'un milliardième des deux résultats fournit le meilleur test à ce jour de la QED.





Ions piégés

Notre équipe développe une plate-forme de refroidissement par laser à 313 nm d'ions beryl- lium, qui sera utilisée pour le refroidissement «sympathique» d'espèces ioniques simples qui ne peuvent pas l'être directement par laser.

L'ion emblématique ainsi refroidi est H_2^+ , le plus simple des ions moléculaires. La spectroscopie vibrationnelle à deux photons sans effet Doppler de cet ion donne une méthode de mesure optique directe du rapport de la masse du proton à celle de l'électron m_p/m_e , avec une incertitude relative de l'ordre de 1 pour 1 milliard, meilleure que celle de l'ajustement de l'ensemble des constantes fondamentales.

La plateforme permettra aussi le refroidissement d'ions multichargés pour des tests poussés de QED et l'étude amont de leurs performances pour les horloges optiques du futur.

Les protocoles de refroidissement sympathique d'ions légers sont très importants pour le projet GBAR visant à mesurer l'effet de la gravité sur l'antimatière pour lequel des atomes d'antihydrogène très lents sont produits à partir de l'ion antimatière \bar{H}^+ .



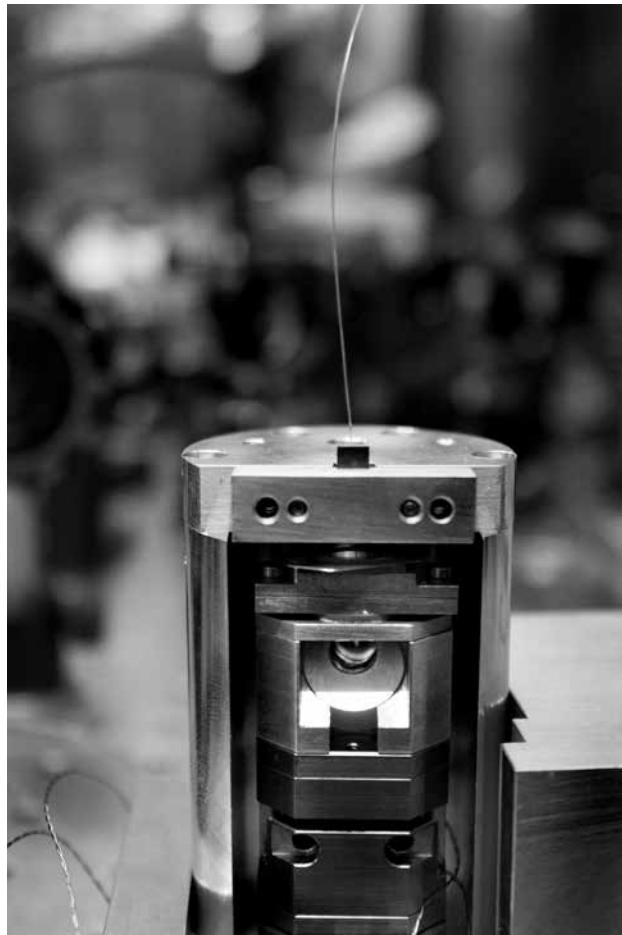


Optomécanique et atomes froids

Un objet macroscopique comme un pendule ou un résonateur mécanique peut-il exhiber un comportement quantique ? Répondre à cette question est l'un des défis dans lesquels s'est lancé l'optomécanique quantique, un nouveau domaine de recherche visant à coupler la lumière à des micro- ou nanorésonateurs par l'intermédiaire de la pression de radiation.

Ceci nécessite de refroidir le résonateur jusqu'à des températures similaires à celle des atomes froids. Ces derniers peuvent d'ailleurs être utilisés avec profit car ils constituent une formidable boîte à outils quantique : en couplant un nuage d'atomes froids à un résonateur mécanique, on espère sonder et contrôler le dispositif mécanique.

C'est une telle expérience que réalise notre équipe en plaçant un nuage d'atomes froids dans l'onde stationnaire réfléchie par un miroir mobile (en fait une nanomembrane suspendue à un cristal photonique). Ce dispositif pourrait permettre de refroidir efficacement la membrane, mais aussi de réaliser une nouvelle plateforme hybride pour l'information quantique.



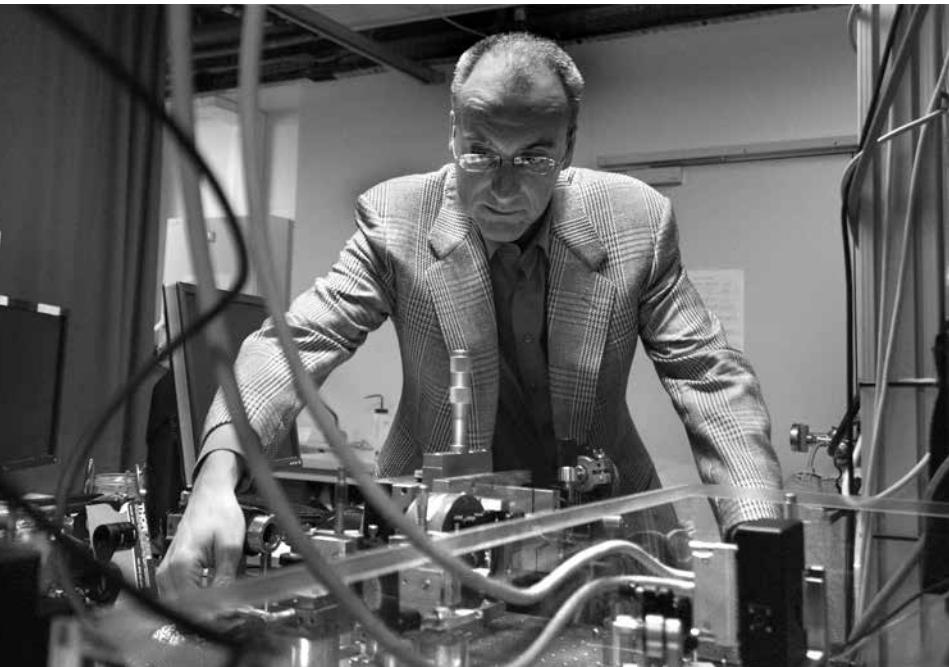
Laboratoire Kastler Brossel

Alberto Bramati

Quentin Glorieux

Élisabeth Giacobino

Optique quantique et semi-conducteurs



À l'interface entre l'optique et la physique des semi-conducteurs, les microcavités à puits quantiques en interaction avec un laser ont permis d'observer des effets d'optique quantique et de fluide quantique.

Dans le régime de couplage fort lumière-matière, le système est décrit par des états mixtes exciton-photon, les polaritons de cavité, qui sont des bosons en interaction. Nous avons mis en évidence la propagation superfluide et l'effet Cerenkov dans un fluide polaritonique créé par excitation laser et aussi une réduction du bruit quantique de la lumière sortante. Nous avons également engendré une paire de solitons noirs hydrodynamiques, ainsi que des demi-solitons dans un fluide quantique spinoriel de polaritons.



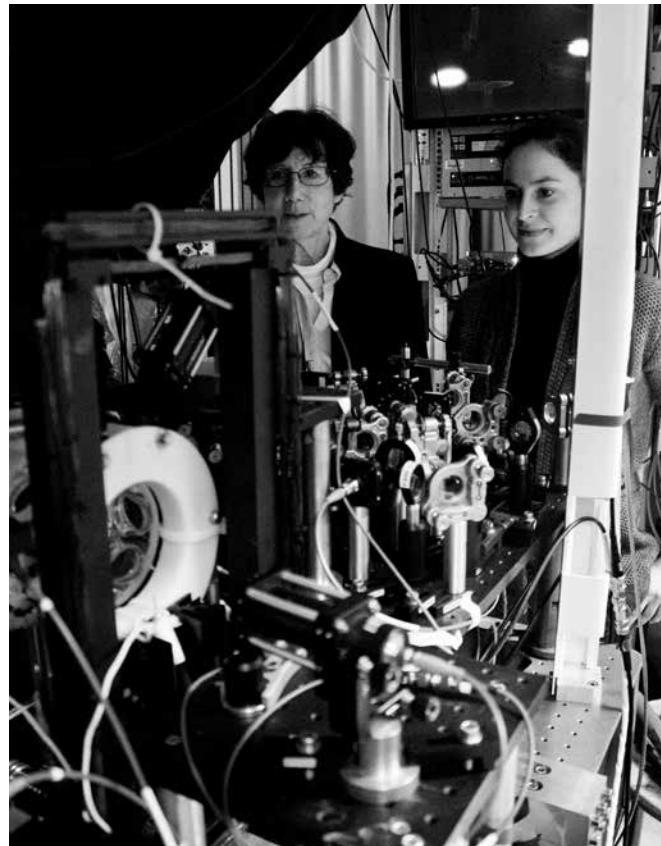


Mémoires quantiques

Réaliser une mémoire, c'est-à-dire l'équivalent d'un disque dur ou d'une clé USB pour des données quantiques, est difficile, car il faut pouvoir stocker les bits quantiques (qubits) sans les lire, ce qui les détruirait.

Pour enregistrer un photon et le récupérer à la demande, nous utilisons des ensembles d'atomes froids, préparés dans un piège magnéto-optique, qui absorbent le photon et se retrouvent dans un état qui est la copie de l'état initial du photon. Avec ces millions d'atomes, le photon a une forte probabilité d'être absorbé et l'excitation est complètement délocalisée.

Notre groupe a montré pour la première fois que l'on pouvait stocker dans ces atomes froids un qubit encodé dans le moment orbital angulaire du photon et le récupérer avec une très bonne fidélité. Alors qu'en se fondant sur la polarisation, un photon ne peut transporter qu'un seul qubit quantique, le moment orbital angulaire donne accès à une base infinie. Avec cette nouvelle base, la prochaine étape est de stocker des dizaines de qubits portés par un seul photon.



Laboratoire Kastler Brossel

Jean-Michel Courty

Romain Guérout

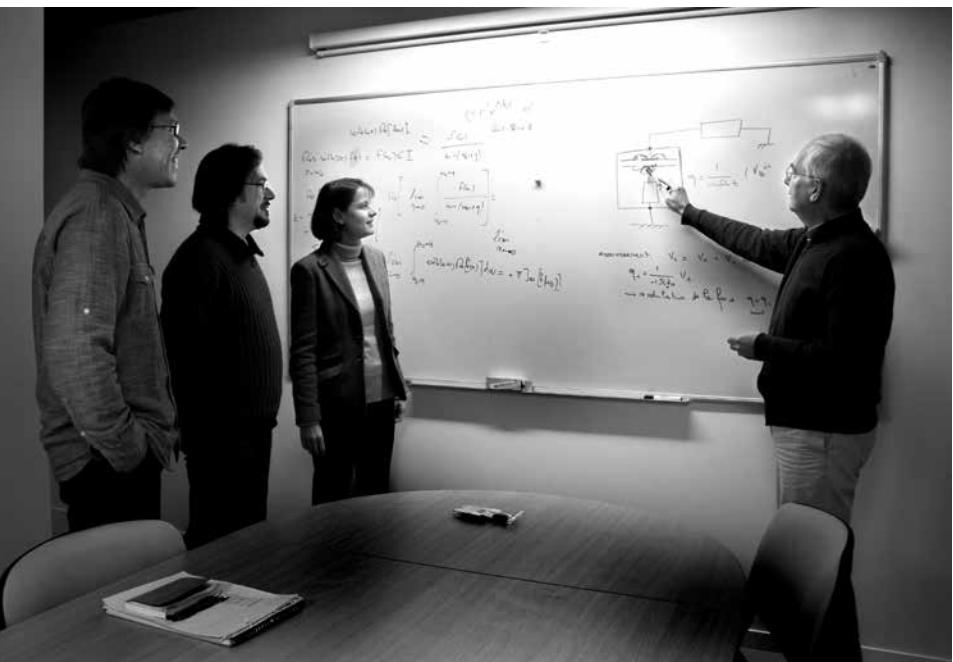
Astrid Lambrecht

Serge Reynaud

Fluctuations du vide

Pour les physiciens quantiques, le vide n'est pas absolument vide. En l'absence de toute matière et à température nulle, l'espace vide possède encore des fluctuations quantiques irréductibles que l'on appelle fluctuations du vide. L'interaction de ces fluctuations avec des objets placés dans le vide se manifeste comme l'apparition de forces agissant sur ces objets ou comme des déplacements des niveaux d'énergie quand il s'agit d'atomes ou de molécules.

Nous étudions ces effets créés par les fluctuations du vide appelés de façon générique «effets Casimir». Les objets étudiés sont des atomes, des molécules, des nanoparticules ou des surfaces matérielles. Ces effets Casimir sont cruciaux dans de nombreuses situations importantes pour la physique des atomes froids ou de nano-objets dans des géométries confinées. Elles conduisent, par exemple, au phénomène de réflexion quantique qui permet d'éviter l'annihilation d'atomes d'antihydrogène s'approchant de surfaces matérielles.



Brouillard d'atomes

Quand le soleil éclaire un nuage, la lumière est diffusée par les gouttelettes d'eau, et cette lumière diffusée est elle-même rediffusée par d'autres gouttelettes. Au final, la lumière se propage dans toutes les directions : c'est pour cela que, dans un brouillard épais, nous sommes incapables de savoir dans quelle direction est le soleil.

Si on remplace le nuage de gouttelettes d'eau par un nuage d'atomes ultrafroids dense, les effets d'interférences quantiques entrent en jeu et peuvent produire un phénomène nouveau : la localisation d'Anderson. Dans cette situation, la lumière reste durablement piégée dans le nuage plutôt que de finir par s'en échapper. Et comme les atomes froids sont aussi des ondes, on peut s'amuser à échanger le rôle des ondes de matière et des ondes lumineuses, c'est-à-dire localiser des atomes dans une onde lumineuse désordonnée ! Dans ce nouveau scénario, on peut exploiter la tendance des atomes ultrafroids à présenter des comportements collectifs, pour ainsi accéder à des situations inédites, où les interférences entre ondes multiples, le désordre et les interactions entre particules se combinent.



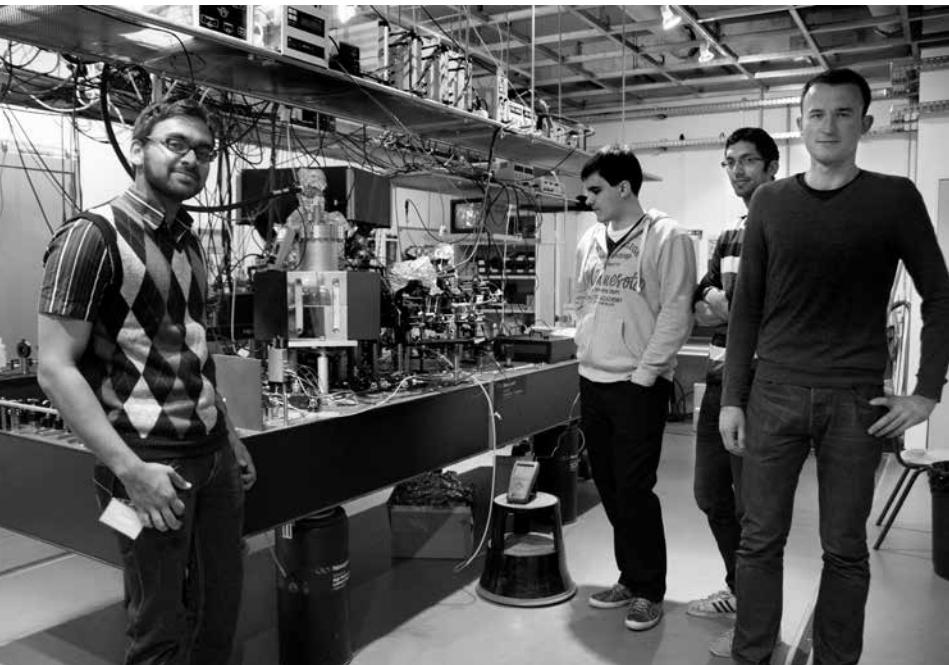
Laboratoire Charles Fabry

Philippe Grangier

Alexei Ourjoumtsev

Rosa Tualle-Brouri

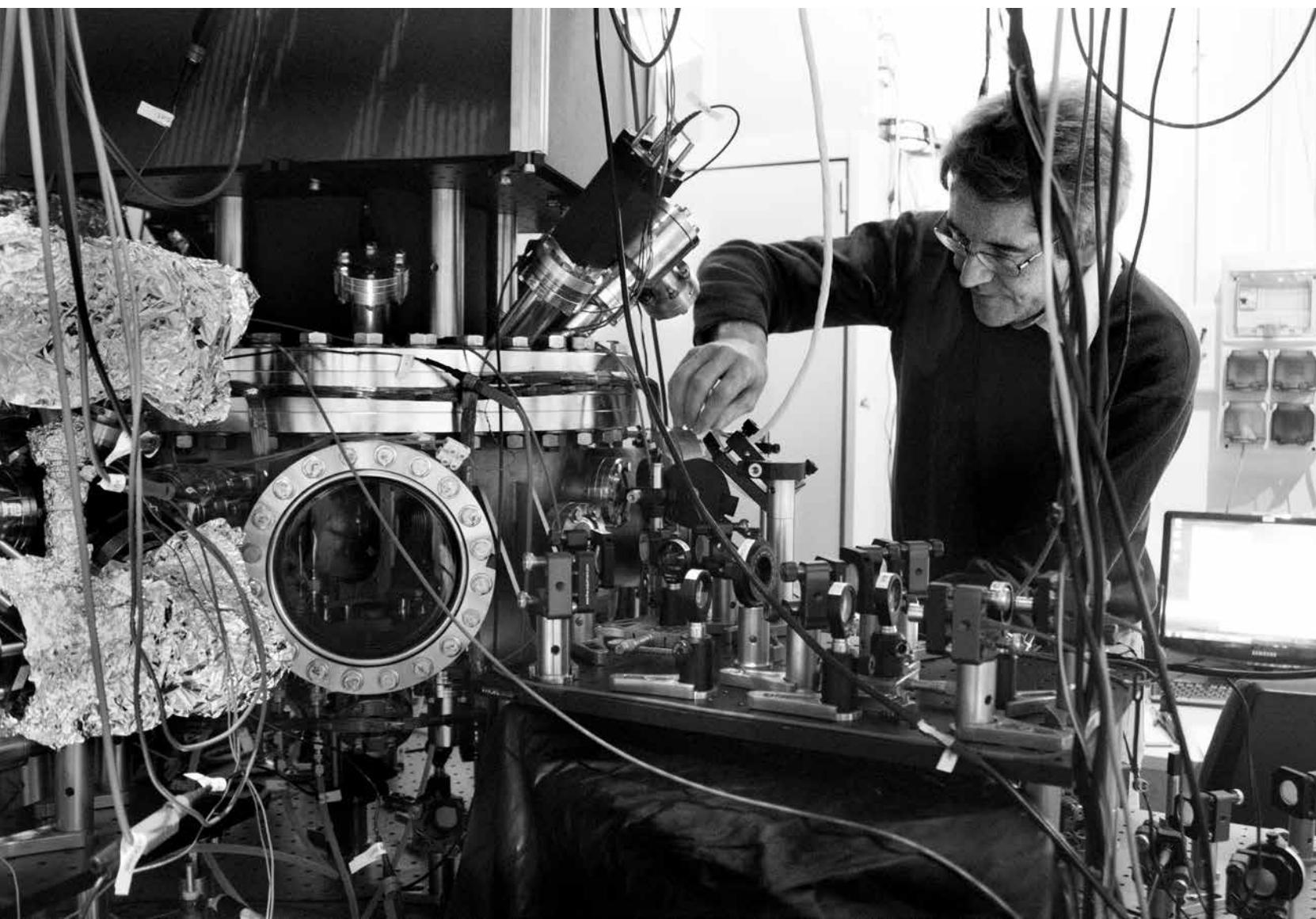
Interactions photon-photon



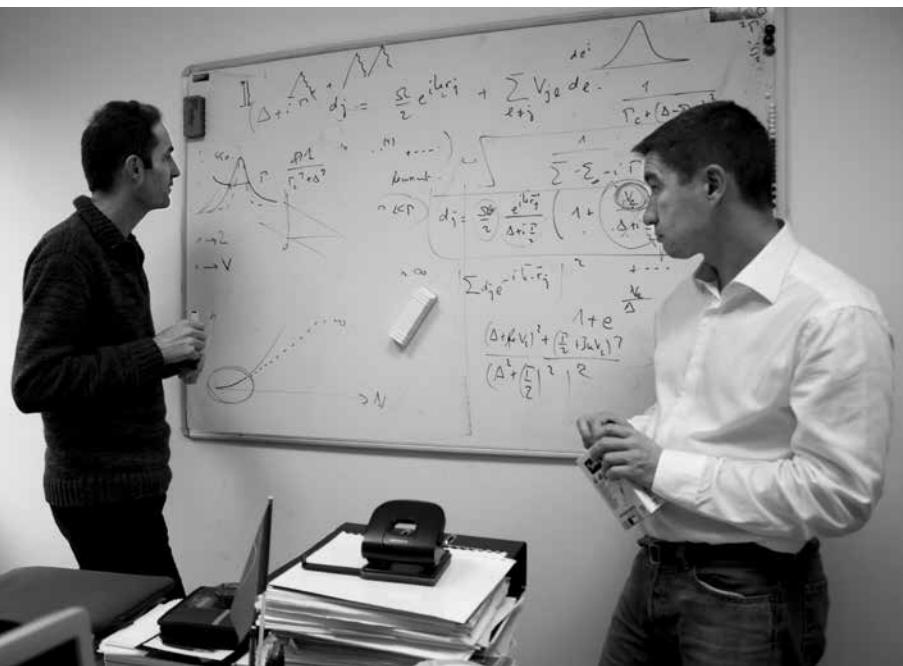
La légende dit qu'au fronton du temple de Delphes (Delphi) étaient gravées les trois maximes « Connais-toi toi-même », « Rien en excès », « Promesse est proche de tromperie ». L'objectif du projet DELPHI, « Deterministic Logical Photon-Photon Interactions », est de parvenir à effectuer des opérations logiques entre des bits quantiques (qubits) portés par des photons.

Les photons sont d'excellents qubits, car ils peuvent transporter avec une grande précision de l'information, codée par exemple sur leur polarisation. En revanche, il est très difficile d'effectuer des opérations logiques entre des photons, car même lorsqu'ils se croisent, ils n'interagissent pas entre eux. Il faut donc trouver un médiateur physique, permettant à deux photons d'interagir pour réaliser une opération logique universelle.

Dans l'expérience DELPHI, les médiateurs sont des atomes portés dans des niveaux très excités, appelés niveaux de Rydberg. Les photons sont temporairement couplés aux atomes, en formant un système composite appelé « polariton Rydberg ». Ces polaritons interagissent très fortement via leur composante atomique, et finalement les photons sont récupérés en gardant la mémoire de cette interaction. De cette idée simple est née une expérience très complexe pour parvenir à ce qu'un jour, les photons parlent aux photons...



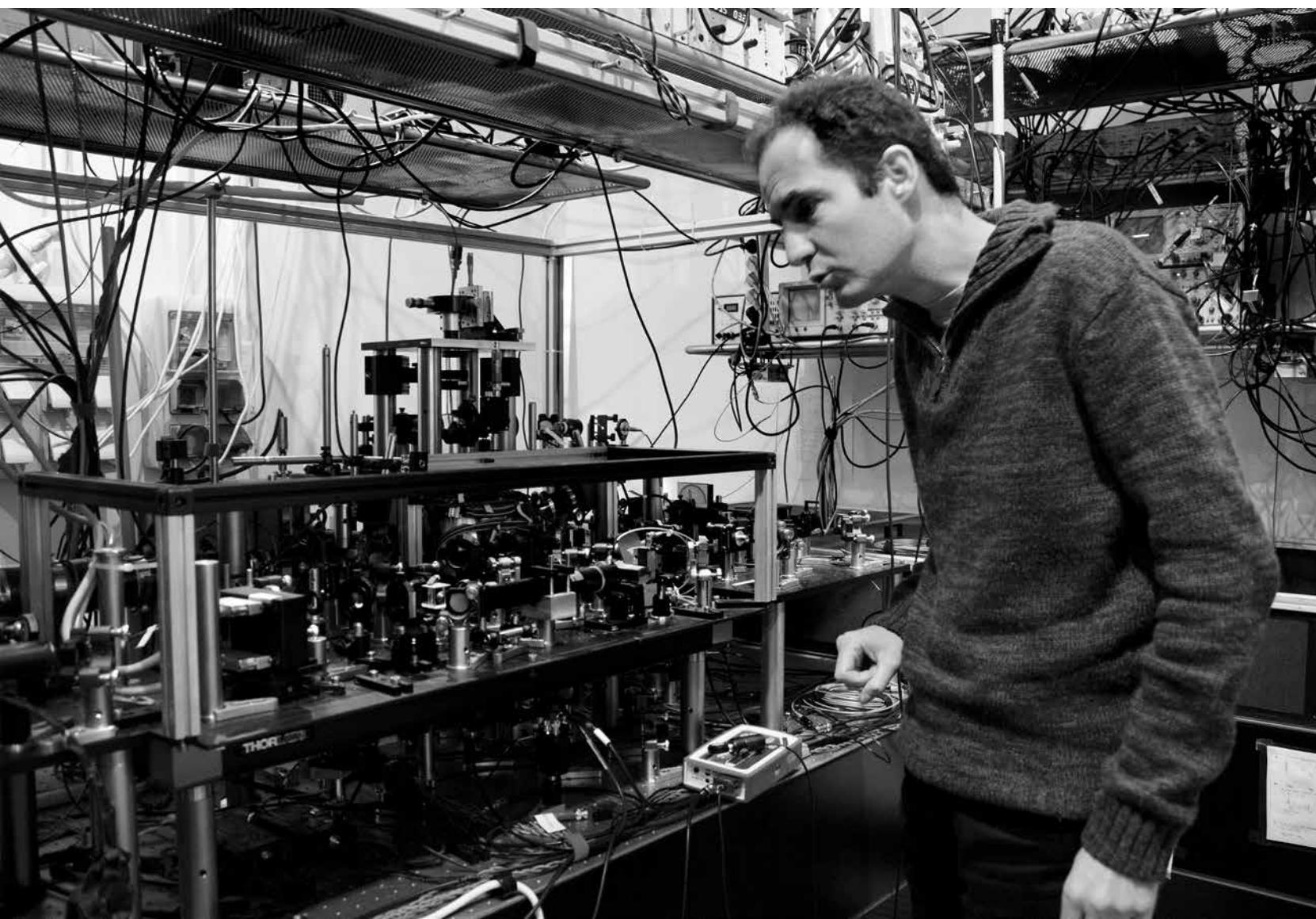
Manipulation d'atomes



Notre équipe étudie le comportement d'un petit nombre d'atomes froids en interaction. Dans nos expériences, les atomes sont piégés dans des lasers très focalisés, appelés « pinces optiques ».

Nous pouvons arranger les pinces en matrices (carré, cercle, hexagone...) et piéger exactement un atome dans chaque pince. À l'aide de lasers, nous les excitons dans des états, dit de Rydberg, pour lesquels un électron est très loin du noyau (la taille de l'atome est pratiquement celle d'une bactérie !) : les atomes possèdent alors des dipôles géants et peuvent interagir même distants de 10 micromètres. En contrôlant ces interactions, nous préparons des états atomiques possédant des corrélations quantiques fortes (intrication), utiles pour l'information, la métrologie ou la simulation quantique.

Nous pouvons aussi piéger une centaine d'atomes dans une seule pince pour étudier comment la lumière est diffusée par ce nuage très dense. La lumière induit des dipôles atomiques qui interagissent. Nous étudions l'influence de ces interactions sur la diffusion de la lumière. Ce phénomène très familier (responsable par exemple du bleu du ciel) reste très mal compris lorsque les atomes interagissent.





Une brève histoire du Groupe d'optique atomique

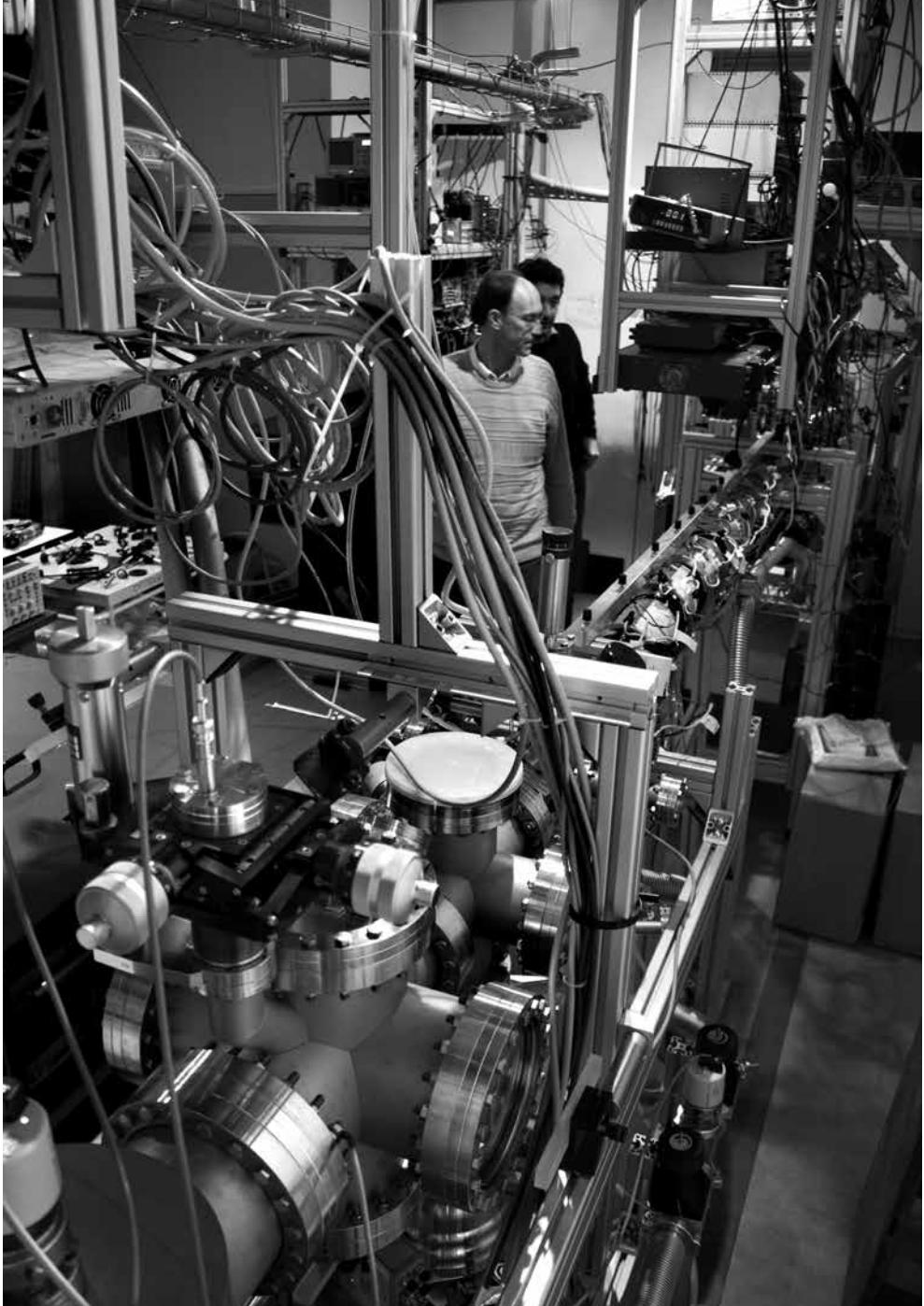
Créé en 1993 avec Nathalie Vansteenkiste, Robin Kaiser, puis Chris Westbrook, sur la thématique des miroirs atomiques, le groupe va s'engager dans l'aventure des condensats de Bose-Einstein gazeux dès 1996, au moment où Philippe Bouyer nous rejoint. L'aide importante du CNRS nous a permis dès le début de nous adjoindre le talent d'électroniciens, Stéphane Martin puis Frédéric Moron et André Villing, et dès 1997 nous obtenons nos premiers résultats dans le domaine des condensats unidimensionnels et des lasers à atomes, tandis que commence avec le SYRTE une activité sur les interféromètres atomiques. D'abord fondamentale, cette recherche conduira à la création de la jeune pousse Muquans, créée avec plusieurs anciens thésards de notre groupe, dont Bruno Desruelle qui la dirige. Philippe poursuit aujourd'hui sa recherche en interférométrie atomique à l'Institut d'optique de Bordeaux, alors qu'Isabelle Bouchoule approfondit l'étude des condensats unidimensionnels sur des puces atomiques.

En 2005 nous abordons la thématique de la localisation d'Anderson, en plongeant nos atomes dans un potentiel désordonné créé par tavelures laser. Nous défrichons le sujet en parallèle avec le groupe de Massimo Inguscio, à Florence, avec l'apport théorique de Laurent Sanchez-Palencia.

Ce sont aujourd'hui deux expériences, pilotées par Vincent Josse et Thomas Bourdel, qui peuvent être considérées comme des simulateurs quantiques d'un « problème difficile » de matière condensée.

Dès 1997, nous avons lancé un programme de refroidissement et piégeage d'atomes d'hélium métastable (He^*) et, en 2001, la thèse d'Antoine Browaeys conduit au premier condensat d'un atome métastable. La possibilité de détecter individuellement ces atomes nous amène à l'idée « d'optique quantique atomique », fondée sur la mesure des fonctions de corrélations. Nous pouvons donc revisiter avec les atomes les grandes étapes de l'optique quantique photonique : effet Hanbury Brown et Twiss, création de paires corrélées... L'équipe initiale de Chris Westbrook et Denis Boiron travaille aujourd'hui avec Marc Cheneau sur l'effet Hong-Ou-Mandel, tandis que David Clément développe une expérience de réseaux optiques.

Grâce à l'IFRAF, notre groupe a ainsi pu ouvrir plusieurs thématiques nouvelles, y compris sur des problèmes de matière condensée, tout en restant marqué par une culture d'opticiens. L'optique atomique a évolué de façon radicale depuis ses débuts, il y a plus de vingt ans, et elle est plus vivante et pleine de promesses que jamais.



Laboratoire Charles Fabry

Christoph Westbrook

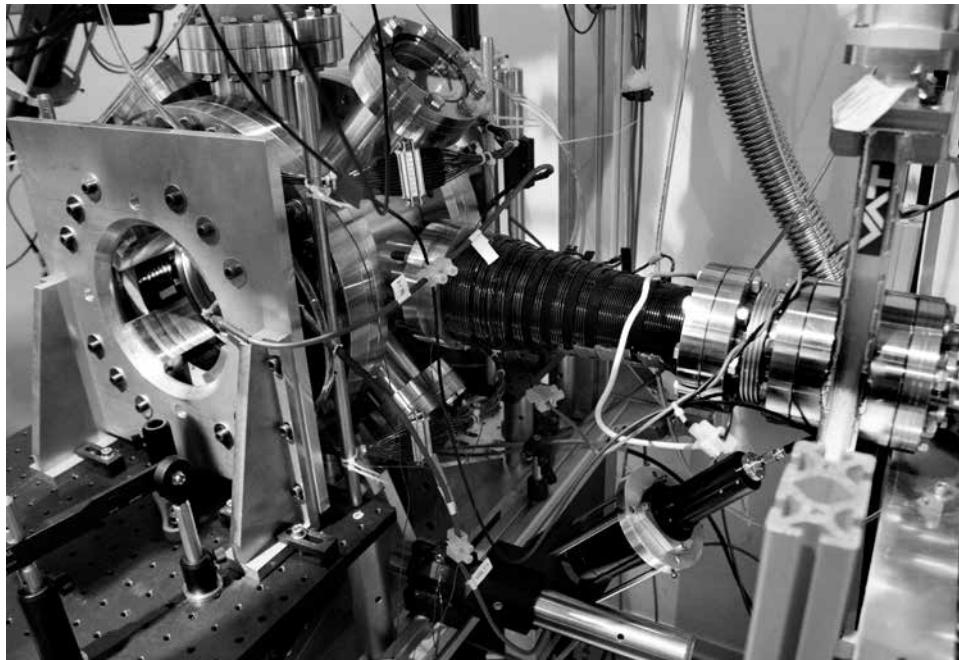
Denis Boiron

Marc Cheneau

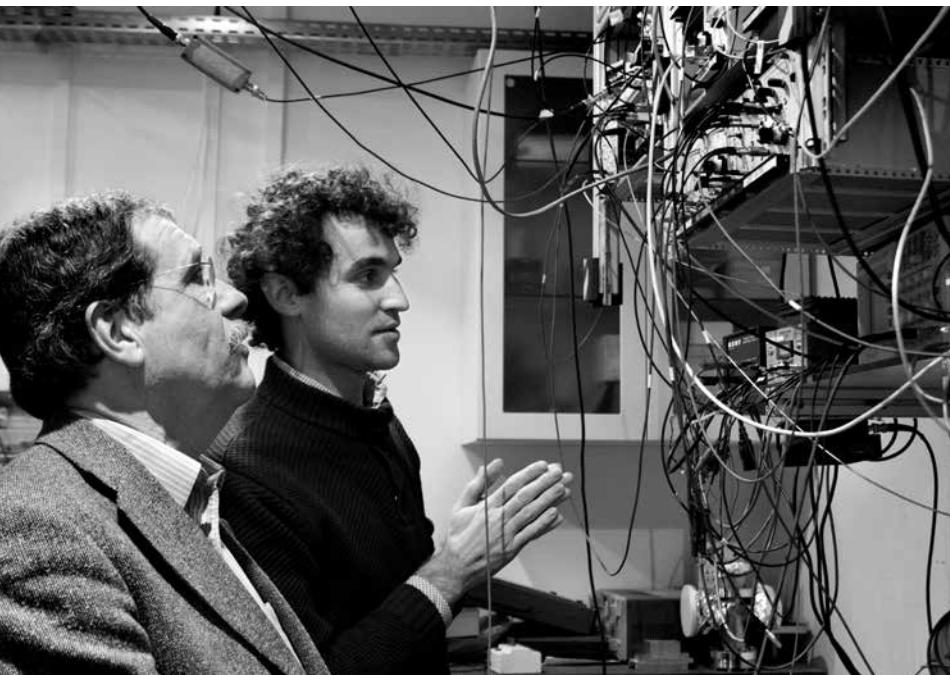
David Clément

La brillance du condensat

L'hélium a une longue histoire dans la physique quantique comme en témoignent la découverte de la supraconductivité et celle de la superfluidité. Notre équipe utilise ce même atome, mais dans un état électroniquement excité, pour poursuivre des recherches sur des condensats de Bose-Einstein et leur utilisation comme source cohérente d'ondes de matière. Comme pour une source cohérente de lumière (un laser), la brillance du condensat peut conduire, à travers des effets non linéaires, à des corrélations quantiques remarquables entre plusieurs atomes. Le grand intérêt de l'hélium métastable est la possibilité d'utiliser son énergie interne pour une détection d'atomes individuels par multiplication d'électrons. Cette technique permet une détection tridimensionnelle d'un nuage d'atomes et la mise en évidence des corrélations entre atomes.



Désordre dans les gaz 2D



Le désordre est une composante quasiment inévitable en matière condensée. Il joue souvent un rôle important, alors que sa modélisation est complexe. Un gaz ultrafroid est un système quantique modèle, notamment pour l'étude de la superfluidité, une propriété extraordinaire résultant du caractère quantique de la matière. Nous en faisons ici un système modèle pour l'étude des effets du désordre que nous ajoutons de façon contrôlée par le moyen d'une figure de tavelure (speckle).

La dimension deux est une dimension critique pour la localisation d'Anderson : tous les états quantiques à une particule sont localisés mais sur une longueur qui croît exponentiellement avec leur énergie. C'est aussi en 2D que la compétition entre superfluidité et désordre est la plus intense, avec par exemple l'observation d'une transition supraconducteur-isolant dans les films métalliques. Le contrôle dynamique de l'intensité du désordre et des interactions, possible dans un gaz froid de potassium, nous permet des études détaillées de ces phénomènes.



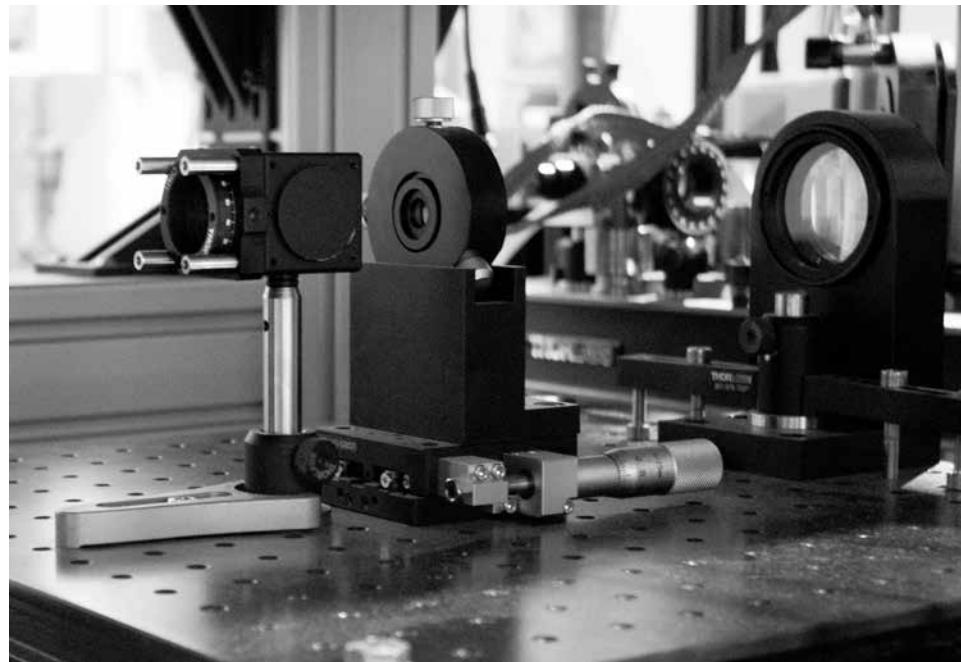


Localisation d'Anderson

Notre équipe étudie la propagation quantique d'ondes de matière en présence de désordre.

En lançant des atomes refroidis à très basse température à travers un paysage désordonné créé avec de la lumière, nous réalisons des systèmes modèles, extrêmement bien contrôlés, pour simuler ces systèmes complexes où de nombreuses questions restent encore ouvertes. Plus spécifiquement, nous étudions actuellement le phénomène spectaculaire et contre-intuitif que constitue la localisation d'Anderson, où les effets d'interférences quantiques entre différents chemins de diffusion s'unissent pour stopper net la propagation des particules, transformant un matériau *a priori* conducteur en isolant.

Plus de cinquante ans après sa découverte, nos expériences visent à répondre aux questions qui demeurent sur ce véritable paradigme de la physique de la matière condensée.

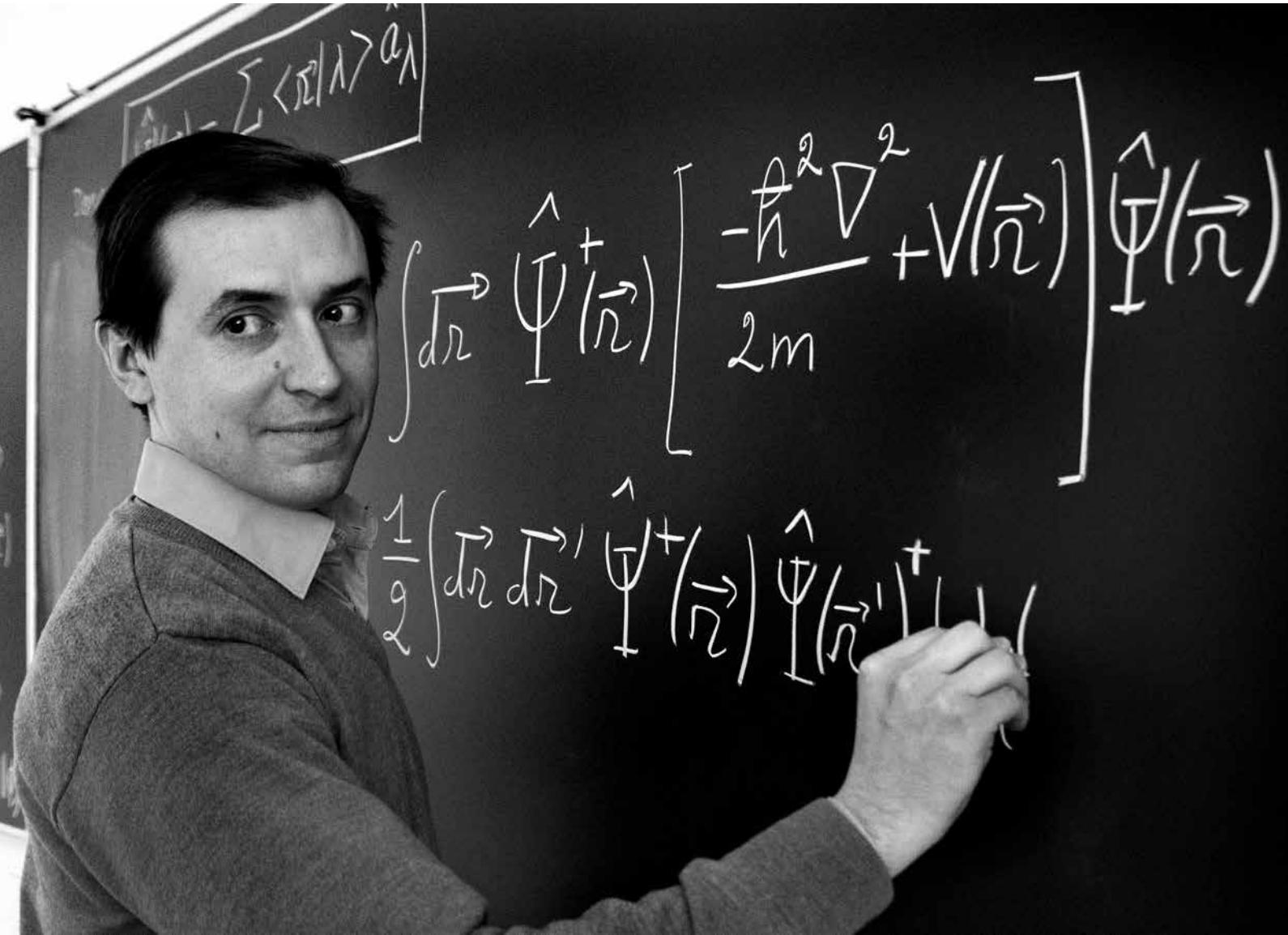


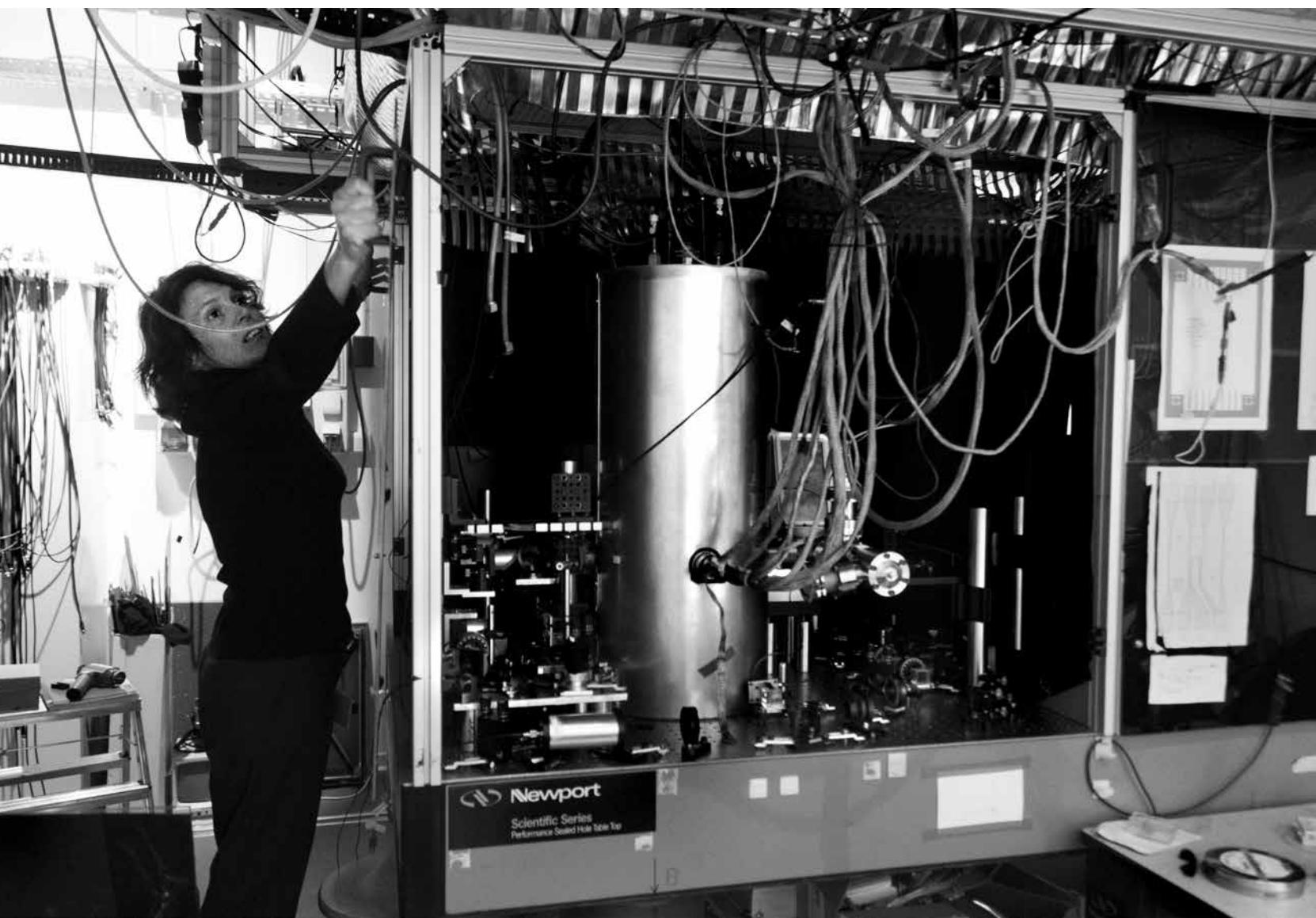
Théorie de la matière quantique

Une grande partie des mystères de la physique quantique cristallise dans le domaine de la matière condensée où cohérence quantique et interactions entre particules se conjuguent pour donner naissance à des phénomènes spectaculaires tels que la superfluidité, la supraconductivité ou la localisation dans les milieux désordonnés. Aujourd'hui, les atomes ultrafroids ouvrent une nouvelle dimension à ces thématiques offrant non seulement des systèmes très bien contrôlés mais aussi des approches nouvelles.

Nous étudions la théorie du comportement de la matière quantique ultrafroide en combinant des approches analytiques et numériques, cherchant notamment à comprendre comment désordre et corrélations quantiques déterminent la dynamique de ces systèmes. Comment la compétition des imperfections du milieu et des interactions entre particules détermine la superfluidité dans ces systèmes ? Quelle est l'influence de la dimension ? Comment l'information se propage-t-elle dans ces systèmes ? Comment un système quantique isolé porté hors d'équilibre évolue-t-il vers un état qui nous apparaît à l'équilibre ? Les progrès spectaculaires des dernières années ont permis de lever un coin du voile mais beaucoup de ces mystères restent encore à éclaircir.







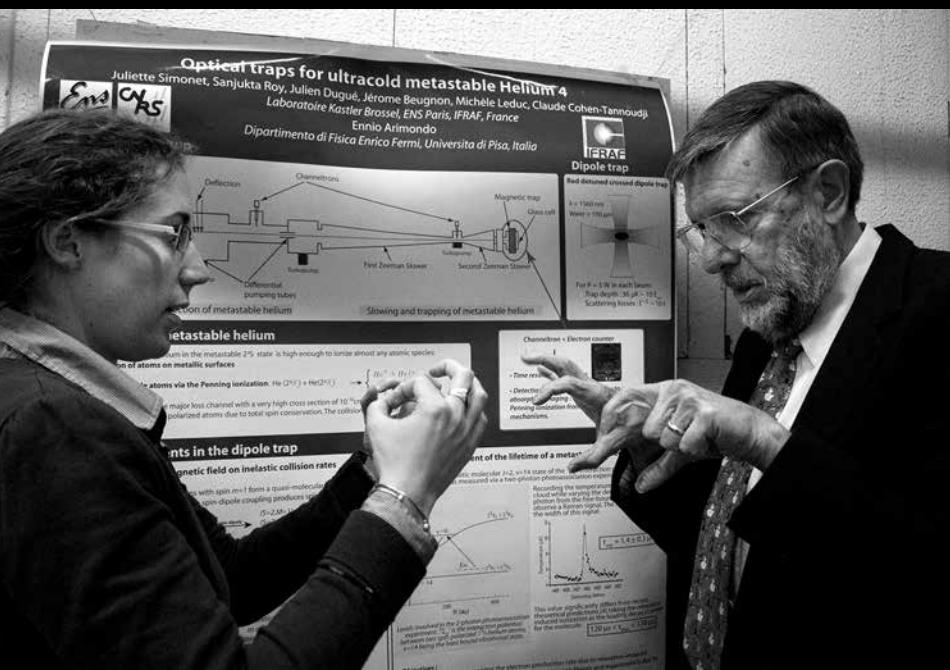
Gaz de bosons unidimensionnels

En faisant passer un courant électrique dans des fils de taille micrométrique déposés sur un substrat, la « puce atomique », on peut obtenir des gradients de champ magnétique très importants. Les atomes, dont le dipôle magnétique interagit avec le champ magnétique, peuvent alors être confinés très fortement. Il est en particulier possible d'obtenir une géométrie unidimensionnelle, les atomes étant confinés le long d'un micro-fil et les degrés de liberté transverses gelés.

Ainsi, dans notre expérience, en utilisant des atomes de rubidium, nous étudions les gaz de bosons unidimensionnels. La physique de ces systèmes est très différente de la physique en dimension deux ou trois. Par exemple, le phénomène de condensation de Bose-Einstein n'a pas lieu. Les interactions entre atomes jouent un rôle très important et il existe une phase « fermionisés » dans laquelle le gaz acquiert des propriétés fermioniques. Nous avons étudié en détail ce système, en analysant notamment des fluctuations de densité atomique.



L'effort de tous



Un laboratoire est le lieu d'une aventure scientifique vécue à plusieurs. L'expérience est le fruit d'une idée, d'une intuition d'un ou de plusieurs chercheurs qui ont eux-mêmes trouvé leur inspiration ailleurs, auprès d'autres. On travaille alors ensemble, on construit, on change d'avis, et quelques années plus tard on se retourne. Pas possible de savoir qui a fait quoi. Difficile de se souvenir pourquoi.

Dans ce processus, les stagiaires, les étudiants en thèse, les post-docs, ont un rôle tout particulier. Ils sont à la fois des apprentis et des chercheurs à part entière, souvent attirés par l'espoir de mieux comprendre, de domestiquer le dragon quantique. Ils se saisissent avec enthousiasme des idées des seniors et apportent leurs propres idées. Ils y croient, peut-être plus que de raison ? Et ça finit par marcher, grâce à eux ! Souvent tard dans la nuit, alors que la plupart d'entre nous dorment...

En bientôt dix ans, quelques centaines d'étudiants, de stagiaires ou de post-docs ont contribué aux différents projets des équipes de l'IFRAF. Le nom de chacun ne figure pas dans ce livre. Mais chaque découverte repose sur leur travail et sur leur inventivité. En retour, on peut estimer que les laboratoires de l'IFRAF ont contribué à faire naître une génération de scientifiques formés aux techniques modernes de l'expérimentation, pleinement conscients de la nature toujours aussi déroutante de la physique quantique et des mystères qui restent à éclaircir.

Bruno Laburthe-Tolra



Système de référence temps-espace

Michel Abgrall

Sébastien Bize

Baptiste Chupin

Jocelyne Guéna

Philippe Laurent

Peter Rosenbusch

Daniele Rovera

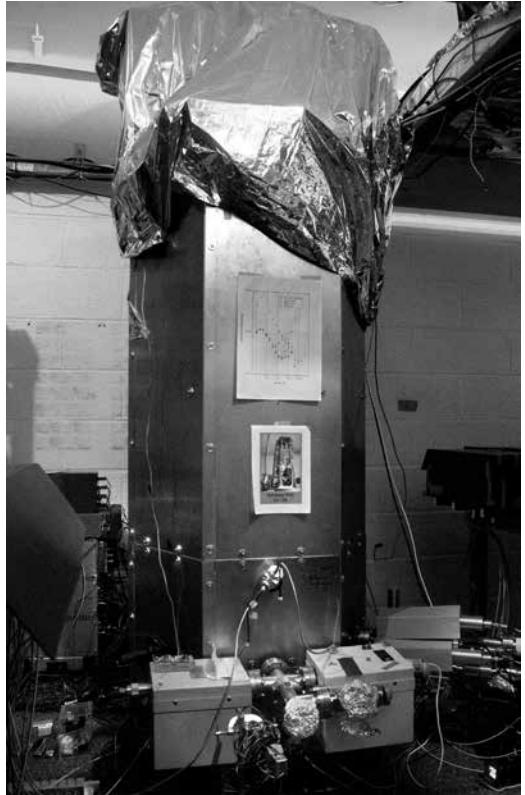


Horloges à atomes froids

La maîtrise du temps a toujours été essentielle à l'humanité, ne serait-ce que pour prédire les saisons de chasse ou des semaines. De nos jours les horloges atomiques coordonnent la vie sociale, les échanges économiques et les systèmes de navigation.

Les horloges à fontaine d'atomes froids furent les premiers instruments à bénéficier du refroidissement laser. Avec la première horloge étalon à fontaine construite au SYRTE, une dizaine d'exemplaires dans le monde pilotent le temps atomique international à l'exactitude exceptionnelle de 1 seconde en 100 millions d'années.

Au-delà de ce service grand public, l'extrême sensibilité de ces horloges permet des mesures très précises de phénomènes quantiques, ou des tests de physique fondamentale tel que le principe d'équivalence d'Einstein et la variation possible des constantes. En vue d'applications industrielles, le SYRTE conçoit aussi des horloges compactes innovantes à température ambiante ou à atomes ultrafroids.





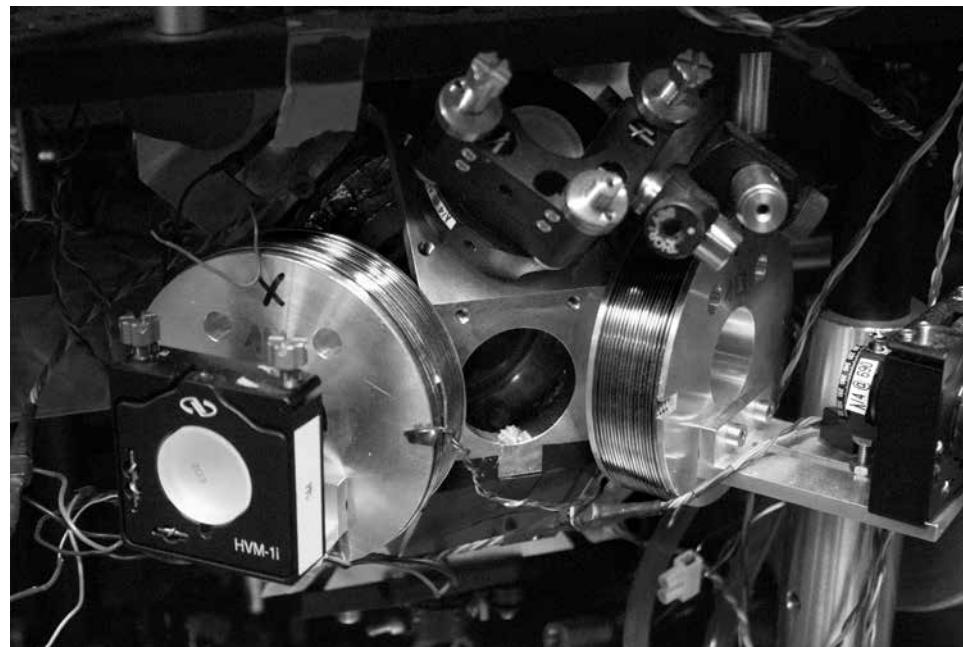
Au plus près de la seconde

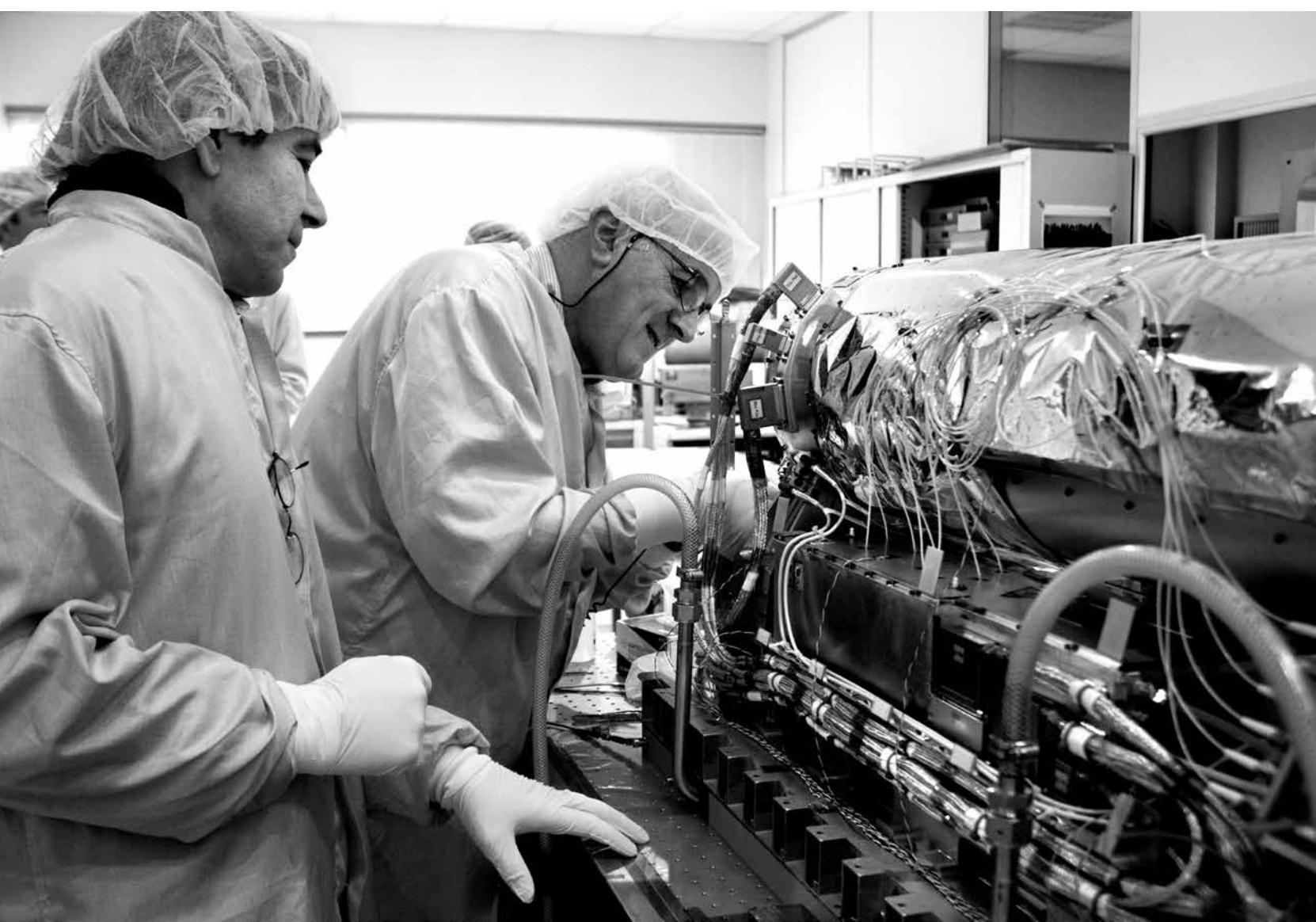
Les horloges atomiques ont leur oscillation de référence dans le domaine optique, c'est-à-dire à des fréquences de l'ordre d'un million de milliard d'oscillations par seconde, surpassant largement les horloges atomiques usuelles du domaine micro-onde.

Notre équipe vise à faire progresser les performances extrêmes des horloges optiques et des méthodes associées, notamment les peignes de fréquence femtoseconde pour leur mesure et les liens optiques cohérents entre elles, par fibre optique ou en espace libre. Elle vise également toutes les applications que permettront les performances de ces horloges : redéfinition de la seconde et connexion avec le domaine micro-onde, investigation de propriétés atomiques, tests de lois physiques fondamentales et de la relativité générale d'Einstein, participation à la mission spatiale ACES/PHARAO et, enfin, utilisation pour la mesure de la gravité terrestre avec applications aux sciences de la Terre.

Système de référence temps-espace

Ouali Acef
Sébastien Bize
Luigi de Sarlo
Yann Lecoq
Rodolphe Le Targat
Jérôme Lodewyck
Paul-Éric Pottie
Peter Wolf





Du temps au temps

Il faut du temps au temps, c'est bien connu.

Qui donne le temps ?

Aujourd'hui c'est le quantique chanté par des atomes de césum, demain par d'autres atomes.

Il faut du temps au temps,

Rien ne sert aux atomes de courir, il faut qu'ils soient tortue, mieux paresseux,

C'est avec cela que les horloges sont les meilleures.

Meilleures ! Pourquoi faire ?

Des choses maintenant naturelles : que dit mon GPS, que raconte mon smartphone ?

Des choses en sciences, des enjeux fondamentaux.

Monde relativiste, monde quantique qui ne se mélangent pas.

L'atome est quantique mais son temps est classique,

Une piste pour transcender des frontières...

Une approche, comparer le temps des horloges en des lieux différents, sur de longues durées, il faut du temps au temps.

La terre avec l'espace, c'est la mission ACES.

Dans l'espace, les atomes lents de PHARAO,

Au sol un large éventail d'horloges,

Entre elles des échanges de signaux.

Quand ?

L'espace est difficile, mais on y arrive.

2016 serait le début,

Il faut du temps au temps.

Système de référence temps-espace

Michel Abgrall

Sébastien Bize

Baptiste Chupin

Pacome Delva

Jocelyne Guéna

Christine Guerlin

Philippe Laurent

Frédéric Meynadier

Peter Rosenbuch

Daniele Rovera

Peter Wolf



Système de référence temps-espace

Christian Bordé

Carlos Garrido-Alzar

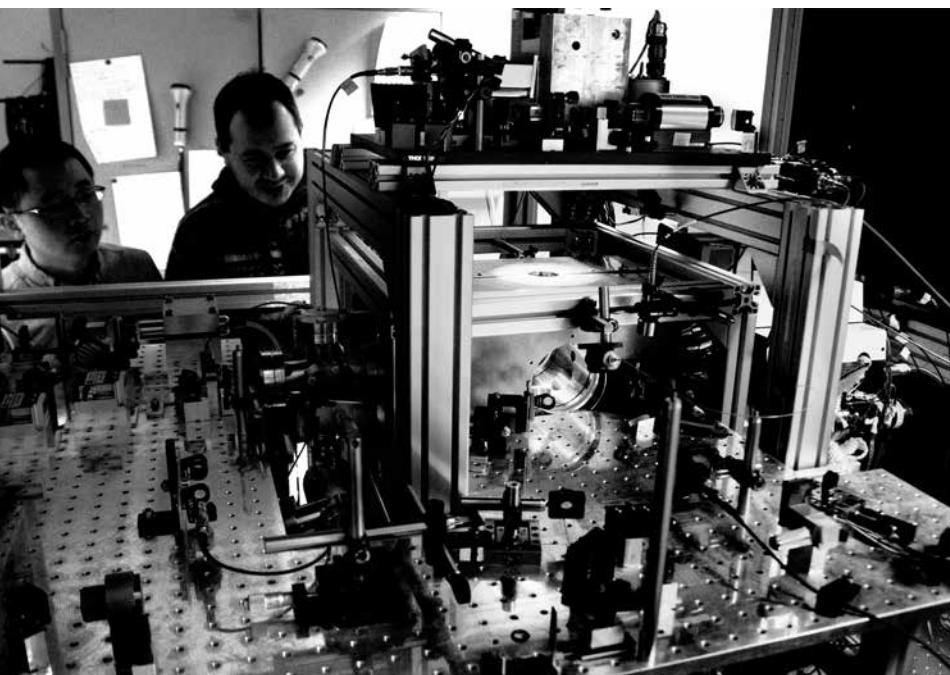
Rémi Geiger

Arnaud Landragin

Sébastien Merlet

Franck Pereira dos Santos

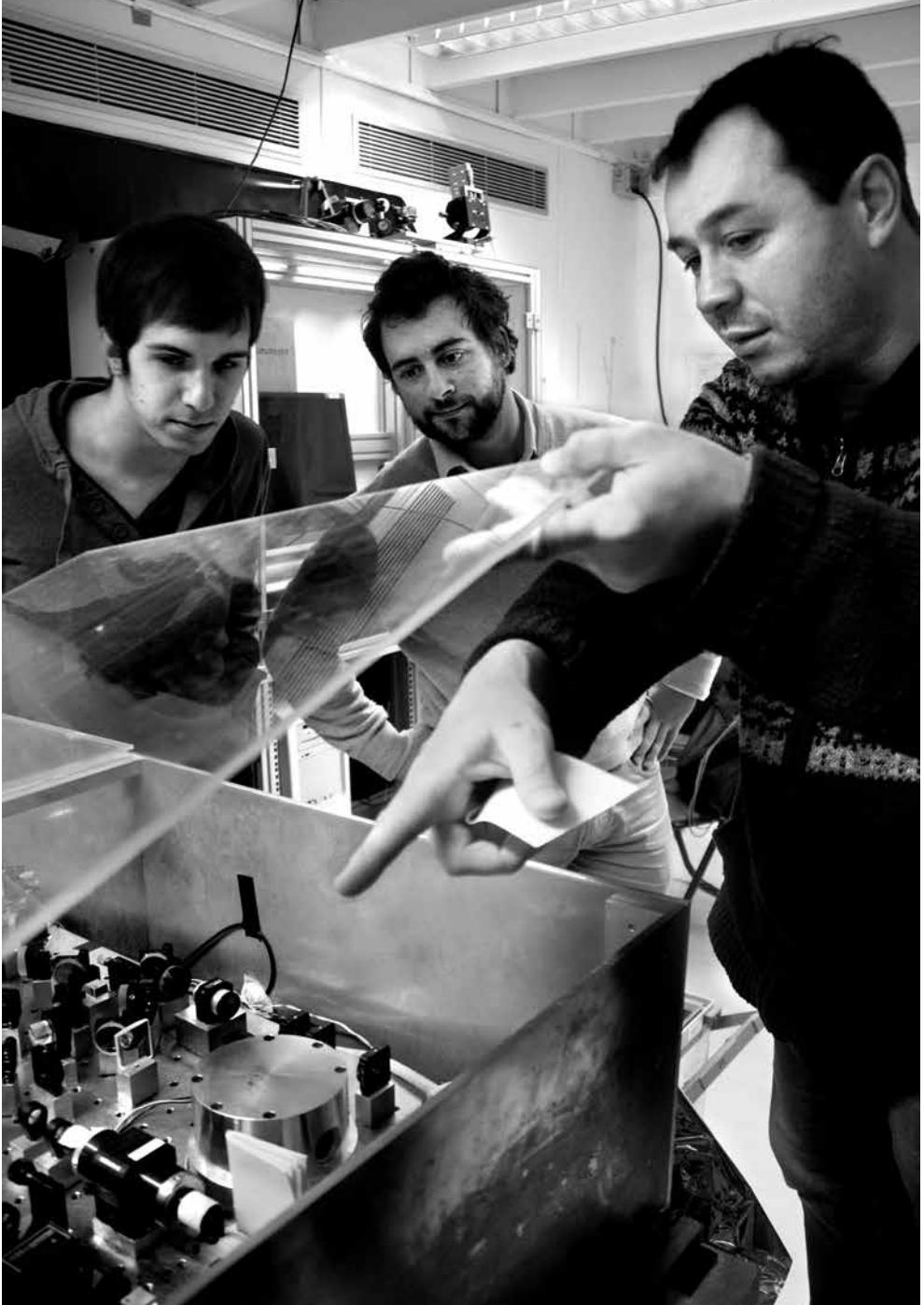
Interférométrie atomique et capteurs inertIELS

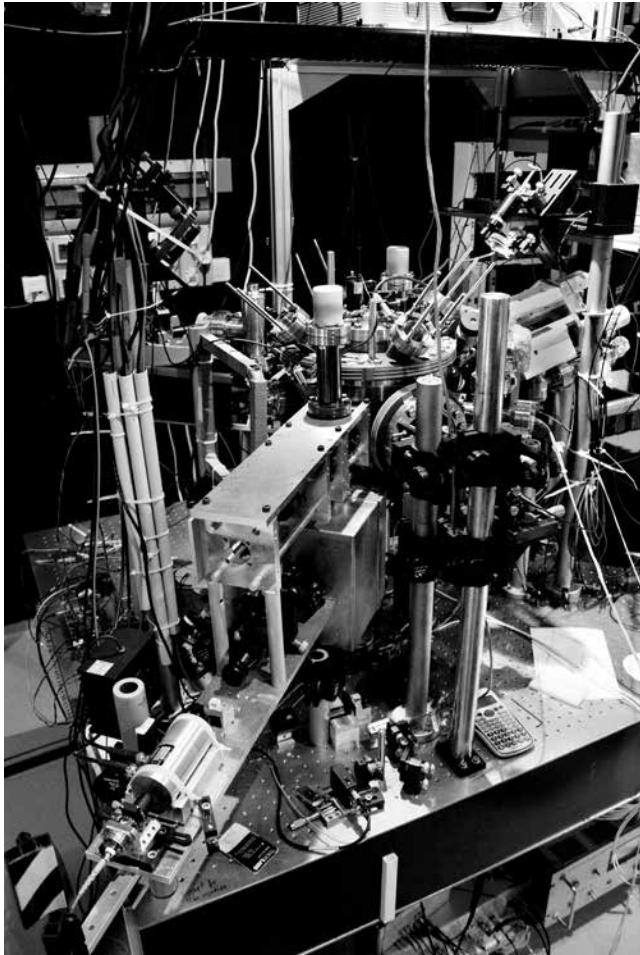


Notre équipe exploite une propriété fondamentale, mais toujours surprenante, de la matière, son caractère dual : les atomes, que nous manipulons avec des lasers, se comportent non seulement comme des particules, mais aussi comme des ondes, susceptibles, comme en optique, de donner lieu à des phénomènes d'interférences. Nous exploitons ce caractère ondulatoire pour réaliser des capteurs inertIELS atomiques de nouvelle génération, dont les performances dépassent déjà sous certains aspects celles des meilleurs capteurs fondés sur des techniques classiques.

Notre activité porte sur la modélisation, le développement et l'étude métrologique d'instruments à atomes froids. Notre objectif est de pousser cette nouvelle technologie de rupture à ses limites de performances.

Les applications des accéléromètres, gyromètres et autres capteurs de forces, à la fois ultrasensibles et exacts, touchent de nombreux domaines, allant de la physique fondamentale à la navigation inertielle en passant par les géosciences.

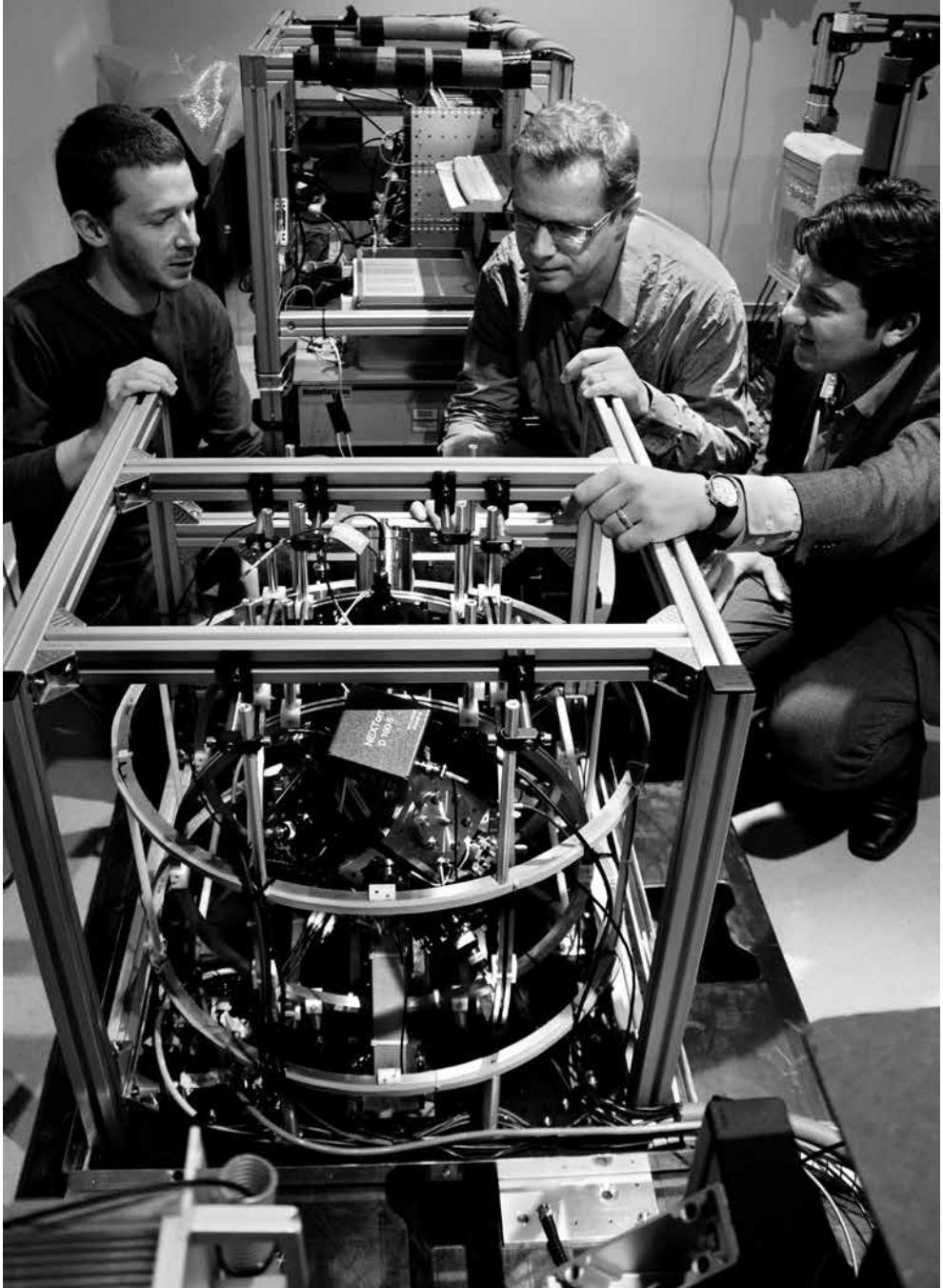




Heure et pesanteur

L'expérience BIARO, entreprise lors du lancement de l'IFRAF par une collaboration entre Philippe Bouyer et Arnaud Landragin, permet de piéger des condensats de Bose-Einstein au cœur d'une cavité à très haute finesse, puis d'effectuer des mesures précises sur l'état quantique ainsi créé, sans le perturber ou même le détruire. On peut alors, par exemple, mesurer l'état au sein d'une horloge atomique sans affecter sa précision, et ainsi améliorer ses performances.

L'expérience ICE exploite la propriété ondu-latoire des atomes lorsqu'ils sont à très basse température : on ne parle alors plus d'atomes, mais d'ondes de matière. Ici, deux espèces d'atomes, du rubidium (Rb) et du potassium (K) sont utilisées pour réaliser deux accéléromètres à ondes de matière simultanément, dans un Airbus reproduisant l'environnement spatial. On peut alors mesurer très précisément si les deux atomes ressentent la même pesanteur et ainsi vérifier le principe d'équivalence faible postulé par Einstein.

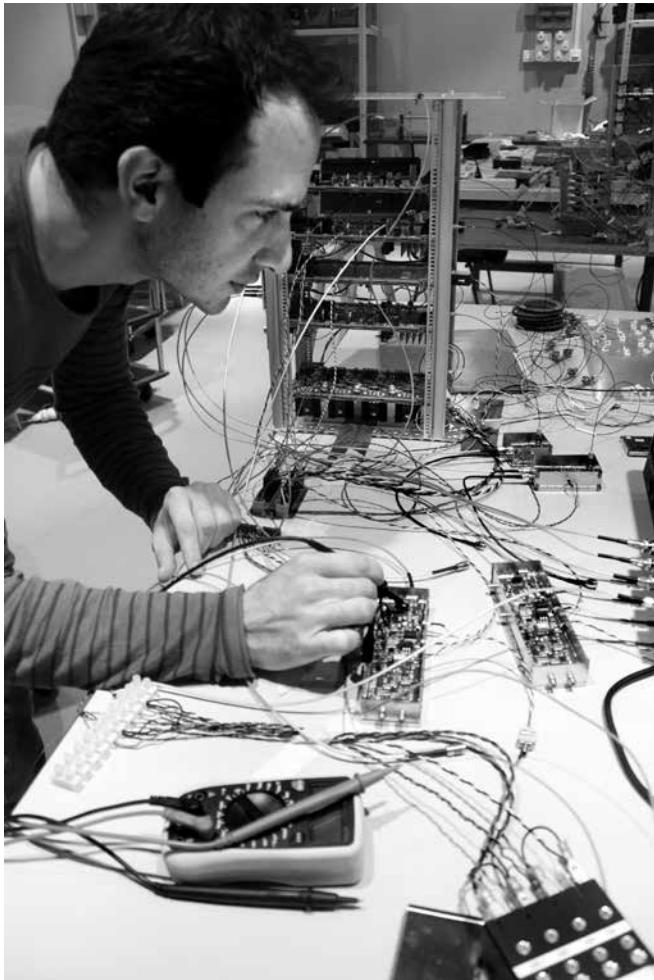


Muquans de Bordeaux

Philippe Bouyer

Bruno Desruelle

Arnaud Landragin



Vers le gravimètre quantique absolu

Muquans est une jeune société de très haute technologie, créée en 2011 et installée dans l’Institut d’optique d’Aquitaine à Bordeaux. Issue des activités de recherche menées au SYRTE, au LP2N et au LCFIO, elle vise à développer une nouvelle génération d’instruments de mesure fondés sur l’utilisation d’atomes refroidis par laser.

Muquans travaille en particulier au développement d’un gravimètre quantique absolu. Cet instrument se situe dans le prolongement du projet MINIATOM soutenu par l’IFRAF. Le travail que nous menons vise à aboutir à un instrument capable de mesurer la gravité avec une sensibilité proche de 10^{-9} g, transportable (75 litres, 50 kg) et entièrement autonome. Il est destiné aux marchés de la géophysique appliquée (volcanologie, sismologie, hydrologie, exploitation des richesses du sous-sol...). Nous travaillons également au développement d’une horloge atomique rubidium offrant une stabilité à long terme proche de 10^{-15} .

Enfin, nous mettons à profit les technologies développées pour ces instruments pour proposer des solutions spécifiquement dédiées à la manipulation d’atomes par laser. Nous sommes ainsi partenaires du projet MIGA (Matter-Wave Interferometer Gravitation Antenna), dans lequel nous avons la responsabilité du système laser de piégeage et refroidissement.

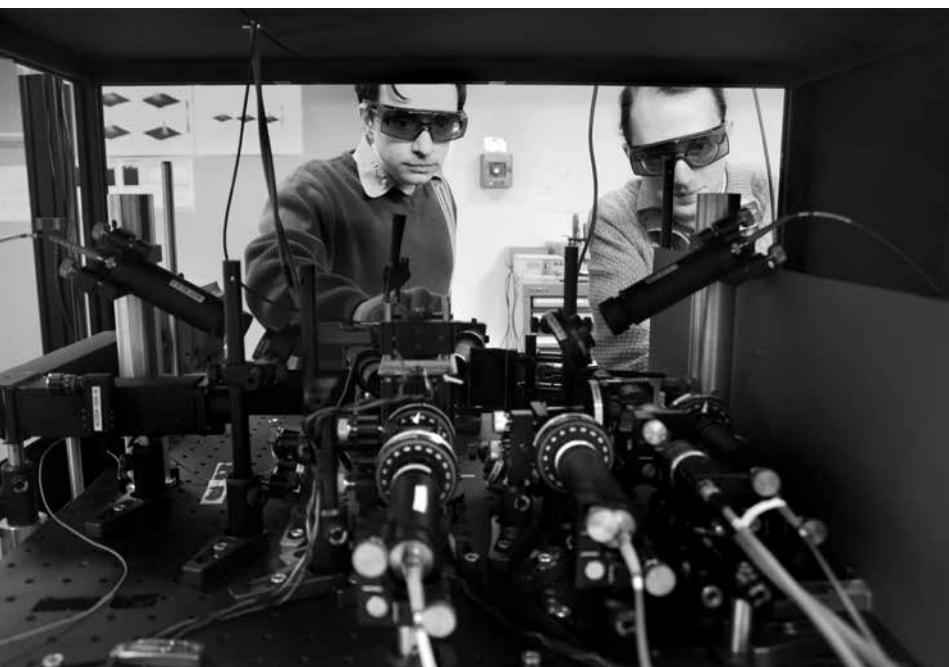
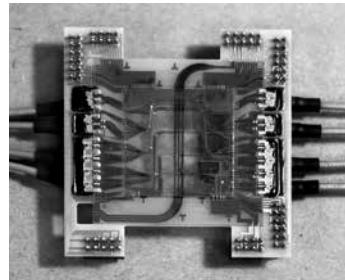


Laboratoire Thales Research and Technology

Matthieu Dupont-Nivet

Jean-Paul Pocholle

Sylvain Schwartz

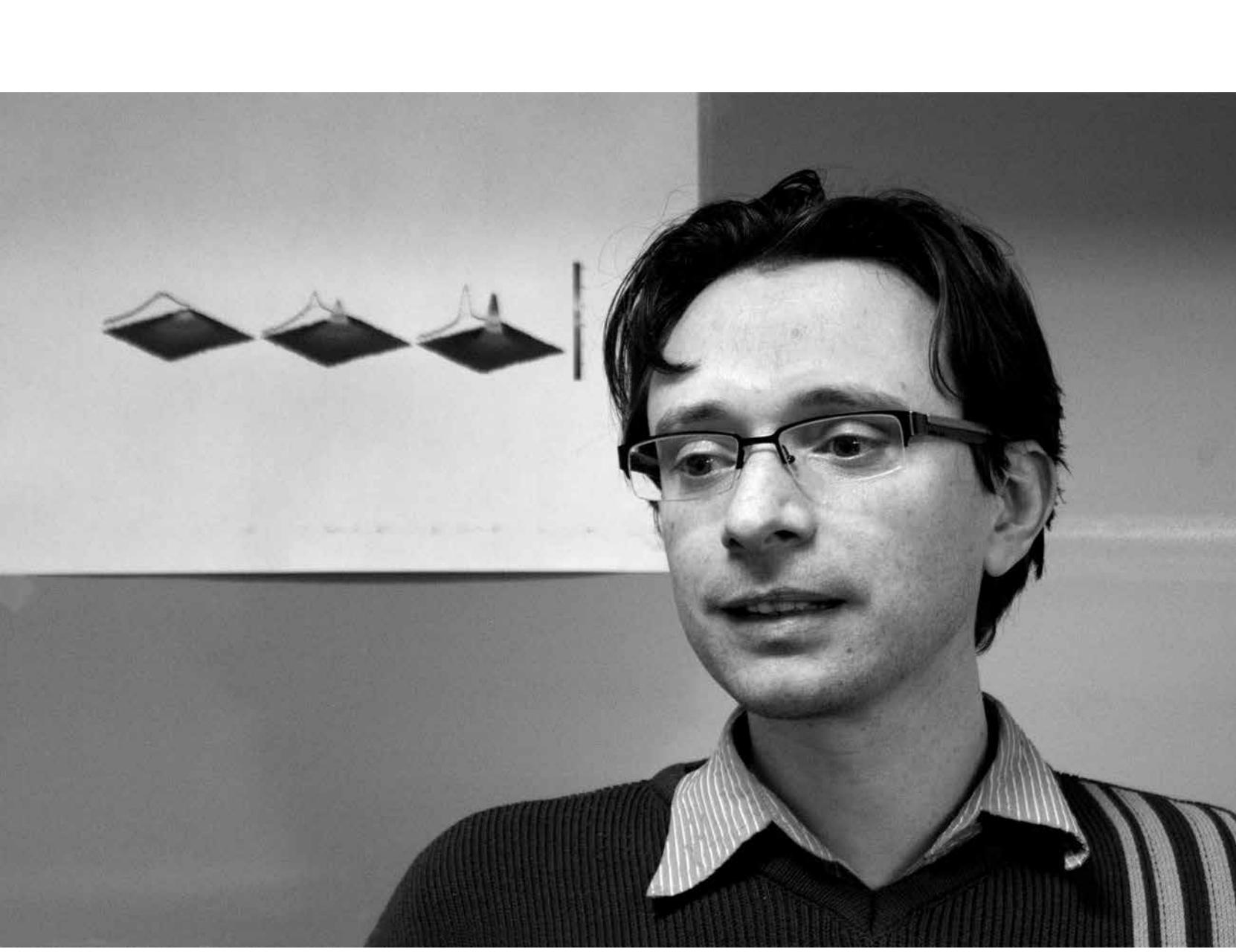


Puces transparentes

Les promesses d'application des atomes froids ont conduit le groupe Thales à entreprendre, il y a quelques années, une activité expérimentale dans ce domaine en collaboration avec l'ENS, le SYRTE et l'Institut d'optique.

Nous avons choisi d'explorer la voie des puces atomiques, qui offrent un fort potentiel d'intégration. En lien avec le 3-5 Lab, nous avons développé des puces transparentes à base de SiC. Notre dispositif expérimental (avec lequel nous avons obtenu notre premier condensat début 2014) a pour but la séparation spatiale cohérente d'états internes du rubidium 87 avec des gradients de champs micro-onde.

L'objectif est de réaliser un interféromètre le plus symétrique possible pour tenter de le faire fonctionner avec des atomes non condensés, dans le but de diminuer les effets des interactions néfastes pour la mesure de la phase.



Savoir-faire

Pour construire une expérience d'atomes froids, on commence par assembler une enceinte complexe dans laquelle on raréfie l'air jusqu'à obtenir un vide extrêmement poussé, typiquement cent mille milliards de fois moins dense que l'atmosphère terrestre. Ensuite on y introduit une petite vapeur d'atomes, par exemple en chauffant un solide, parfois jusqu'à 1 500 °C. Enfin, on utilise des faisceaux lasers pour refroidir ce gaz : on fixe la fréquence du laser de telle sorte que les atomes n'absorbent de la lumière que lorsqu'ils se dirigent dans le sens opposé au sens de propagation du faisceau laser. En une fraction de seconde, la température des atomes est alors réduite à seulement quelques millionièmes de degrés au-dessus du « zéro absolu de température », soit -273 °C.

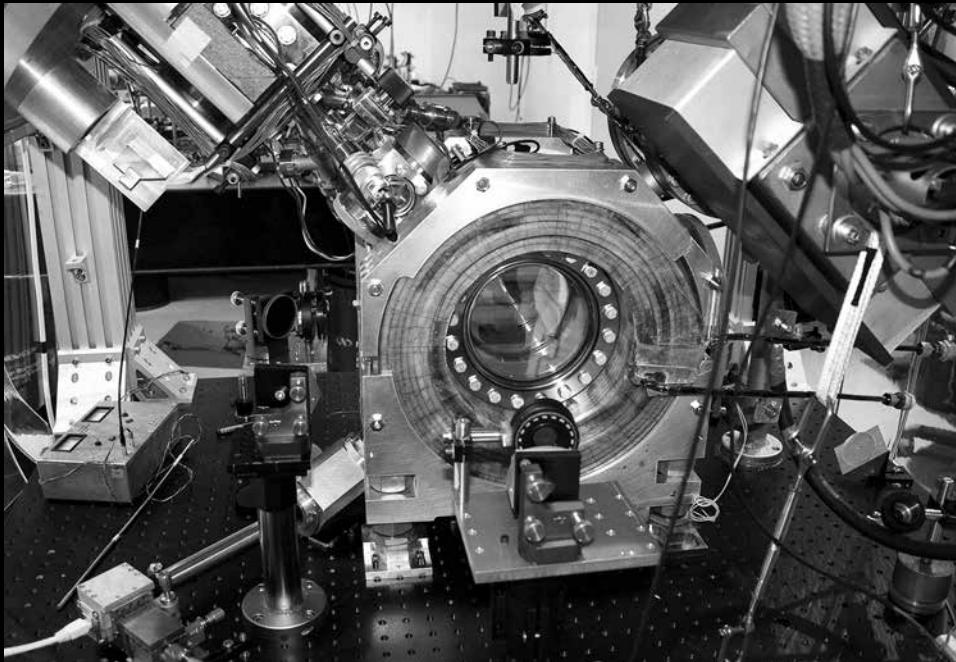
Une fois les atomes refroidis, on peut les piéger loin des parois de l'enceinte en utilisant des combinaisons de champs magnétiques, élec-



triques ou laser. Ils peuvent aussi être piégés au voisinage de nanostructures produites en salle blanche ou dans des cavités optiques formées de miroirs presque parfaitement réfléchissants. Enfin, les mesures de précision réalisées avec des atomes froids vont de pair avec le développement d'oscillateurs ultrastables et de techniques d'asservissement toujours plus raffinées.

Les atomes froids reposent donc sur des technologies variées combinant lasers, ultravide, électronique rapide et optique de précision, des systèmes informatiques élaborés pour le pilotage des séquences d'expérience et l'exploitation des résultats. Ces techniques sont développées à la fois dans les salles « de manip » et dans les ateliers des laboratoires, qui jouent un rôle extrêmement important pour ce type de recherche d'une grande complexité expérimentale.

Bruno Laburthe-Tolra



Laboratoire de physique des lasers

Anne Amy-Klein
Christian Chardonnet
Frédéric Du Burck
Olivier Lopez
Vincent Roncin



Lien optique et temps-fréquence

Les nouvelles horloges optiques atteignent des stabilités et des exactitudes impressionnantes qui en font des outils idéaux pour des mesures de très haute sensibilité dans les domaines les plus divers. Mais comment transférer ces signaux ultrastables entre laboratoires ?

Nous avons démontré la transmission sans dégradation d'un signal d'horloge par des fibres optiques du réseau internet. Le signal transféré est au moins dix mille fois plus stable que celui du GPS. Nous travaillons maintenant sur le développement d'un réseau fibré à l'échelle française et européenne : quelle architecture choisir ? Comment transmettre à très grande distance le signal ? Ce réseau peut-il constituer un gyromètre à fibre géant ? À court terme, ces développements permettront la comparaison des meilleures horloges européennes.



Laboratoire de physique des lasers

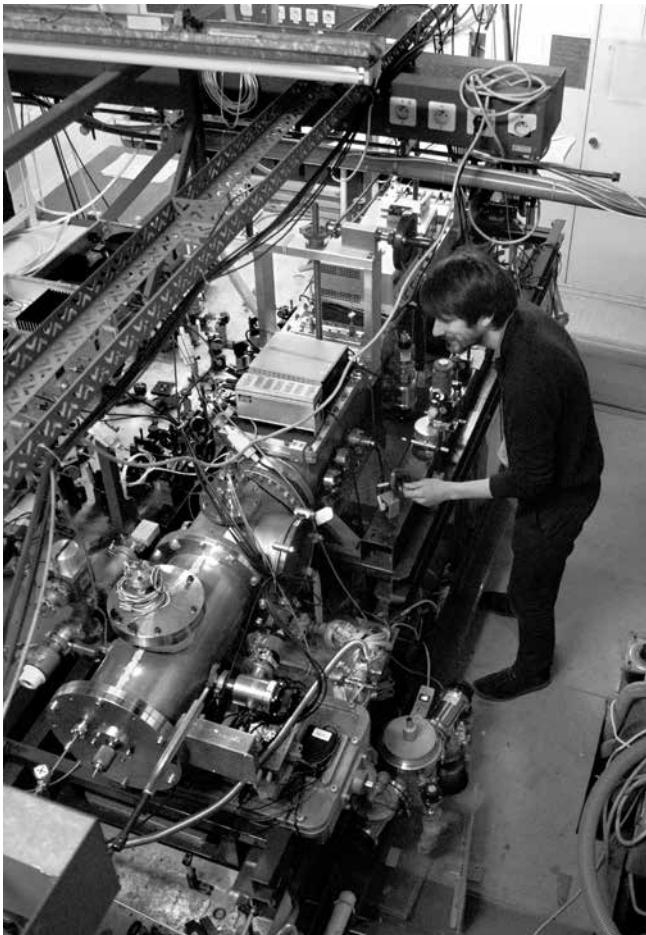
Anne Amy-Klein

Christian Bordé

Christian Chardonnet

Christophe Daussy

Benoît Darquié

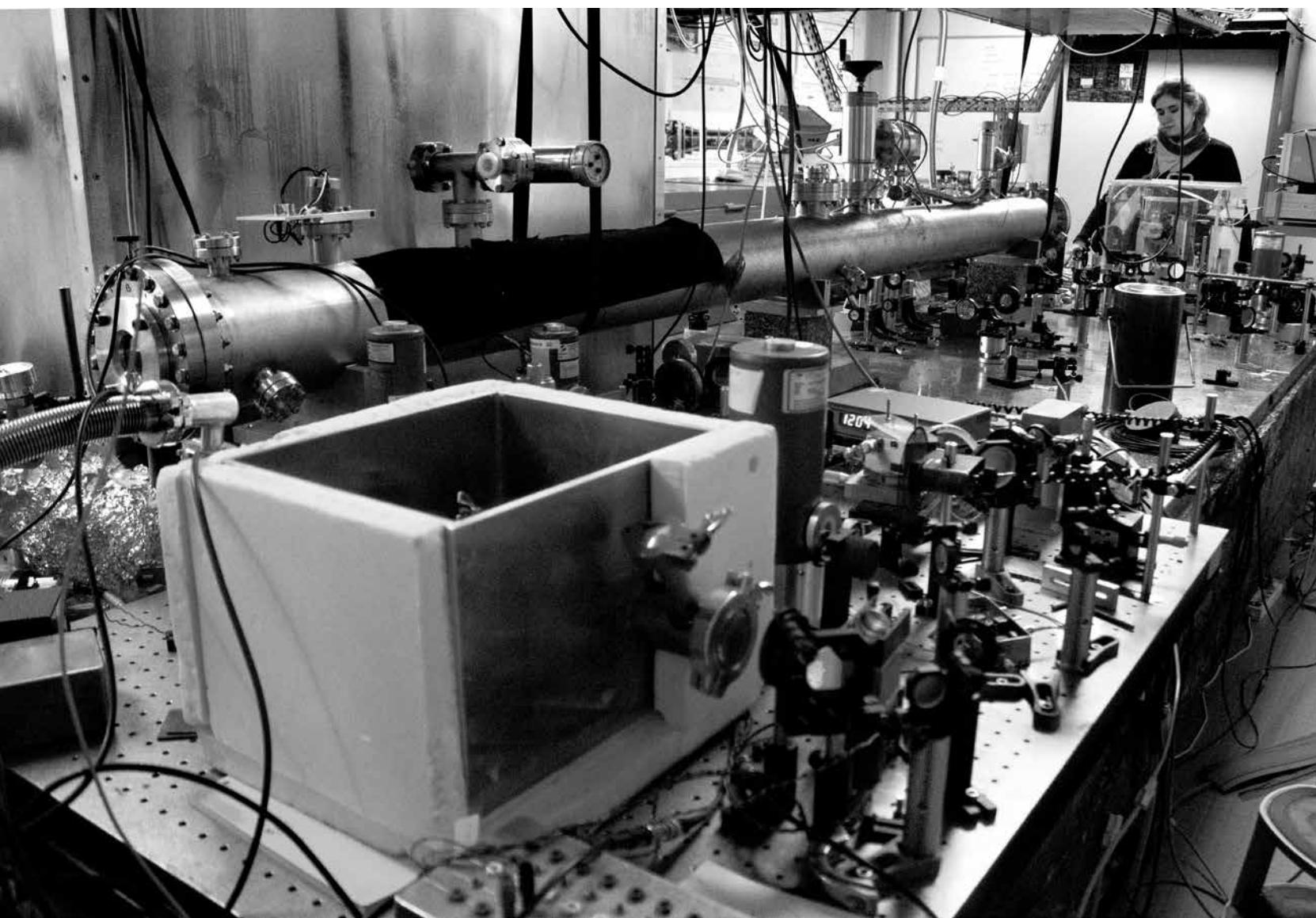


Sondes moléculaires

Les molécules permettent de réaliser des expériences de physique fondamentale complémentaires de celles menées sur des atomes. Elles offrent une physique plus riche et sont potentiellement plus sensibles, par exemple pour tester certains effets de violation de symétrie ou mesurer des constantes fondamentales.

Dans notre groupe, nous développons des dispositifs expérimentaux originaux pour sonder des molécules par spectroscopie laser dans des conditions très bien contrôlées. Nous avons ainsi mesuré la constante de Boltzmann, dans le cadre de la future redéfinition de l'unité de température.

Nous cherchons aussi à observer pour la première fois la violation de la symétrie de parité dans les molécules. Ce projet constitue un réel défi expérimental tant l'effet attendu est faible.





Une puce pour la soupe

L'Univers peu après le big bang est souvent décrit comme une soupe de particules extrêmement chaude en train de subir un refroidissement rapide du fait de l'expansion de son volume. À l'échelle quantique, ce refroidissement éclair pourrait avoir été responsable d'une modification brutale de la phase quantique dans laquelle les particules se trouvaient. Cette transition de phase aurait été ici tellement violente que de petits défauts topologiques (des trous par exemple) seraient apparus au sein de la soupe originelle. Dans certains modèles cosmologiques, ces défauts expliqueraient l'organisation spatiale de la matière au sein de l'univers que nous connaissons.

Dans notre équipe, nous tentons de simuler avec une expérience en laboratoire de telles transitions de phase, dans le but de confronter les résultats expérimentaux aux modèles théoriques. Le cœur du dispositif est constitué d'une puce à atomes permettant de refroidir et de manipuler des atomes de sodium dans des micropièges magnétiques. Ainsi, un nuage d'atomes microscopique peut nous éclairer sur les premiers instants de l'Univers tout entier.

Laboratoire de physique des lasers

Thomas Badr
Romain Dubessy
Vincent Lorent
Aurélien Perrin
Hélène Perrin



Laboratoire de physique des lasers

Thomas Badr

Romain Dubessy

Laurent Longchambon

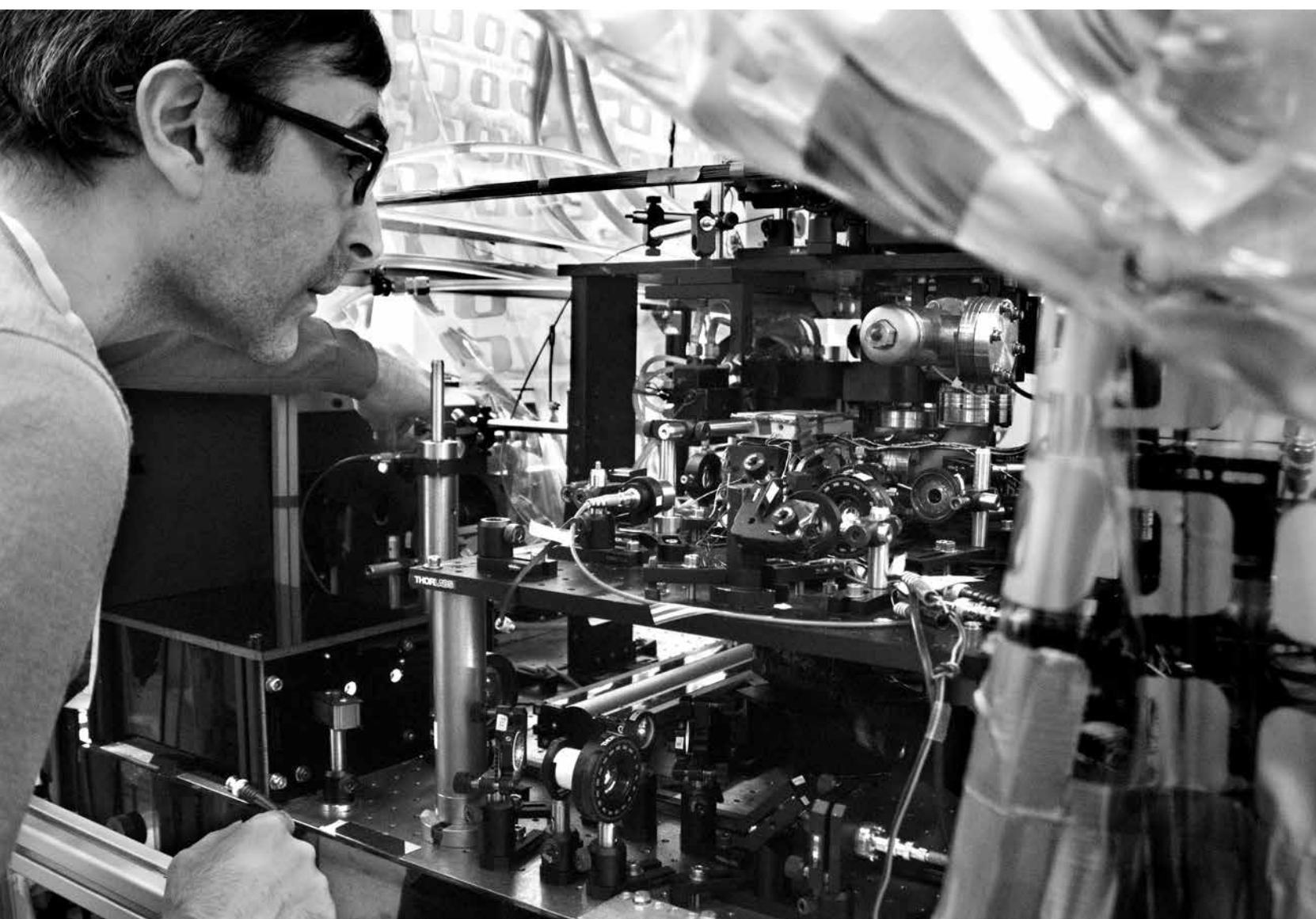
Hélène Perrin

Un superfluide à double sens



Si, en général, on évite de tourner en rond quand on veut faire avancer la science, c'est au contraire ce que nous cherchons à obtenir dans cette expérience. Une fois piégés dans un tube refermé sur lui-même en forme d'anneau, des atomes de rubidium ultrafroids deviennent superfluides. Un superfluide, c'est un gaz ou un liquide (comme par exemple l'hélium liquide à très basse température) qui peut s'écouler sans frotter contre les parois du récipient qui le contient. Ici, le gaz peut donc tourner en rond presque indéfiniment, maintenu dans un anneau par des champs magnétiques et des lasers. La superfluidité est une propriété quantique du gaz en mouvement : il en résulte que la vitesse de l'écoulement ne peut prendre que certaines valeurs autorisées par la mécanique quantique.

On peut imaginer alors préparer un état quantique où le superfluide s'écoule à la fois dans un sens et dans l'autre, une sorte de chat de Schrödinger à deux têtes qui pourrait avoir des applications pour le calcul quantique ou les mesures de précision.





Des atomes comme des aimants

Les atomes de chrome sont des atomes très fortement magnétiques. Ils interagissent à longue distance par une interaction de type dipôle-dipôle, c'est-à-dire exactement comme des aimants (quantiques). Les gaz froids constitués d'atomes de chrome représentent donc des systèmes utiles et originaux pour l'étude du magnétisme.

Récemment, par exemple, nous avons utilisé des ondes lumineuses stationnaires pour piéger ces atomes dans un potentiel périodique : les atomes s'arrangent alors spontanément dans un cristal artificiel. Chaque atome localisé dans chaque site de ce réseau est un aimant, couplé à tous ses voisins du fait des interactions dipolaires. Nos expériences permettent donc l'étude du magnétisme dans le régime quantique et possèdent de fortes analogies avec la physique de la matière condensée.

Si les principes fondamentaux à l'origine du magnétisme sont bien établis depuis environ un siècle, les propriétés magnétiques des matériaux sont en général très difficiles à expliquer, du fait de leur extrême complexité. Les questions parmi les plus brûlantes en physique de la matière condensée portent, par exemple, sur le lien entre magnétisme et supraconductivité ou sur le magnétisme frustré. C'est ce type de questions que nos atomes de chrome permettront peut-être d'explorer.

Laboratoire de physique des lasers

Olivier Gorceix

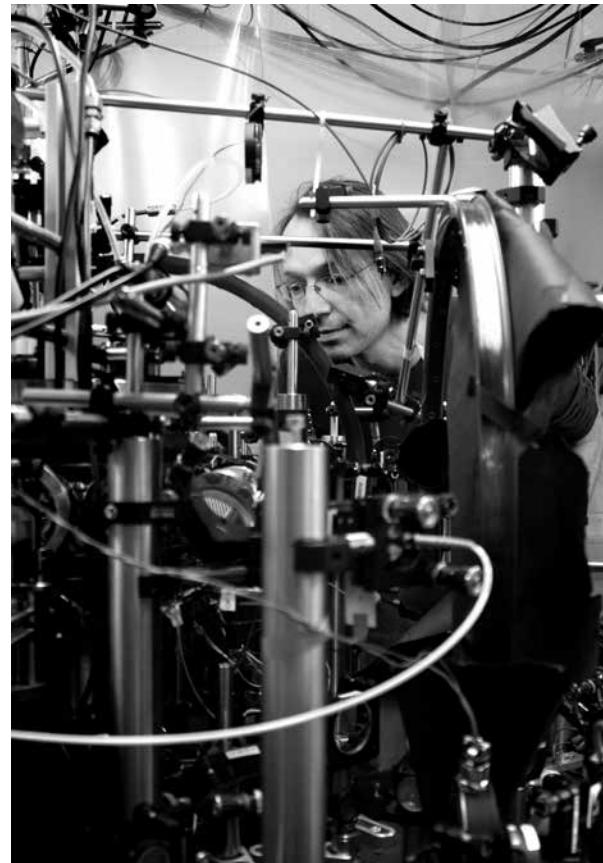
Bruno Laburthe-Tolra

Étienne Maréchal

Paolo Pedri

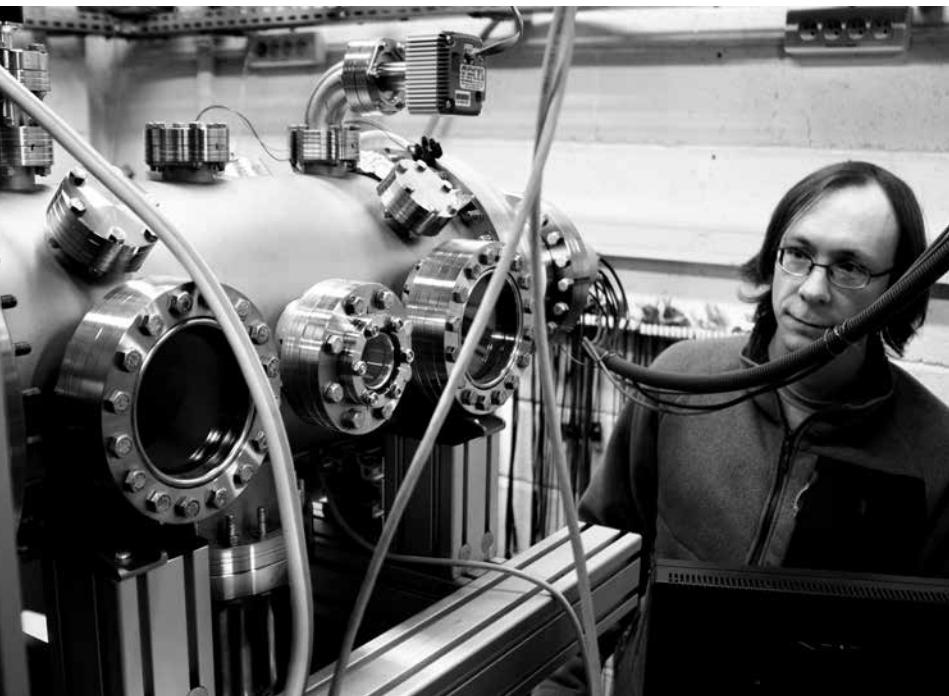
Martin Robert-de-Saint-Vincent

Laurent Vernac



Laboratoire de physique des lasers

Jacques Baudon
Martial Ducloy
Gabriel Dutier
Nathalie Fabres
Marie-Pascale Gorza
Constantin Mainos
Francisco Perales



Nanométrie

Comment voir un champ électromagnétique à une échelle inférieure à sa longueur d'onde ? C'est à cette problématique que l'utilisation de paquets d'ondes atomiques nanométriques d'argon métastable propose des réponses. En effet, la détectivité exceptionnelle des atomes métastables, résolue à la fois en temps et en position grâce à l'émission d'un électron lorsque l'atome heurte un détecteur, permet une mesure directe de la figure de diffraction d'un jet atomique lent (entre 10 et 30 m/s) ayant traversé le potentiel créé par les champs à étudier. L'avènement des nanotechnologies pose des questions quant aux possibilités de couplage entre des atomes froids et les champs électromagnétiques générés par ces nanostructures.

Une configuration particulière de champ magnétique peut aussi imiter un effet d'indice négatif pour les atomes et ouvrir des perspectives innovantes pour l'interférométrie et la métrologie.





Les atomes de Rydberg froids

Les atomes de Rydberg sont des atomes « géants » de type hydrogénoides, excités dans des états de nombre quantique principal allant jusqu'à cent et plus. Ils possèdent des propriétés très « exagérées » : ainsi ils interagissent entre eux jusqu'à cent milliards de fois plus que des atomes dans l'état fondamental. Notre équipe produit des atomes de Rydberg refroidis par laser (atomes « géants gelés ») et exploite de différentes façons leurs interactions dipôle-dipôle à très longue portée.

D'une part, nous étudions avec du cézium des résonances dites de Förster, contrôlées par un champ électrique, qui permettent d'isoler des effets à quelques corps là où les phénomènes à N corps dominent : l'objectif est une étude de superradiance et la réalisation de portes quantiques. D'autre part, nous développons un projet à base d'atomes d'ytterbium, dont un électron sera excité vers un état de Rydberg et l'autre servira au contrôle laser de l'atome.



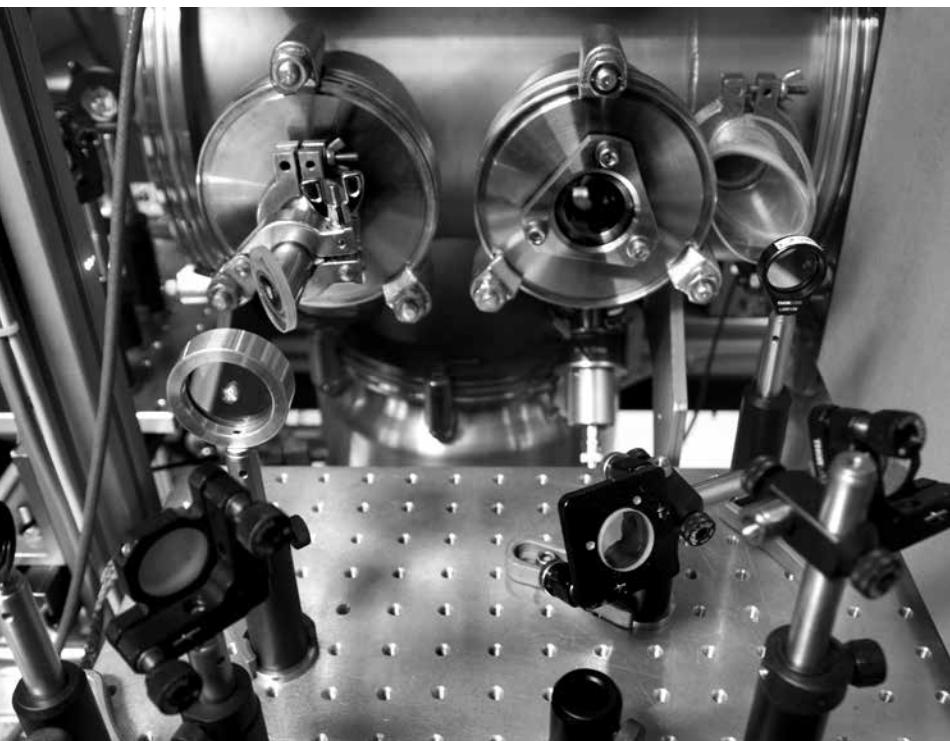
Laboratoire Aimé Cotton

Daniel Comparat

Hans Lignier

Pierre Pillet

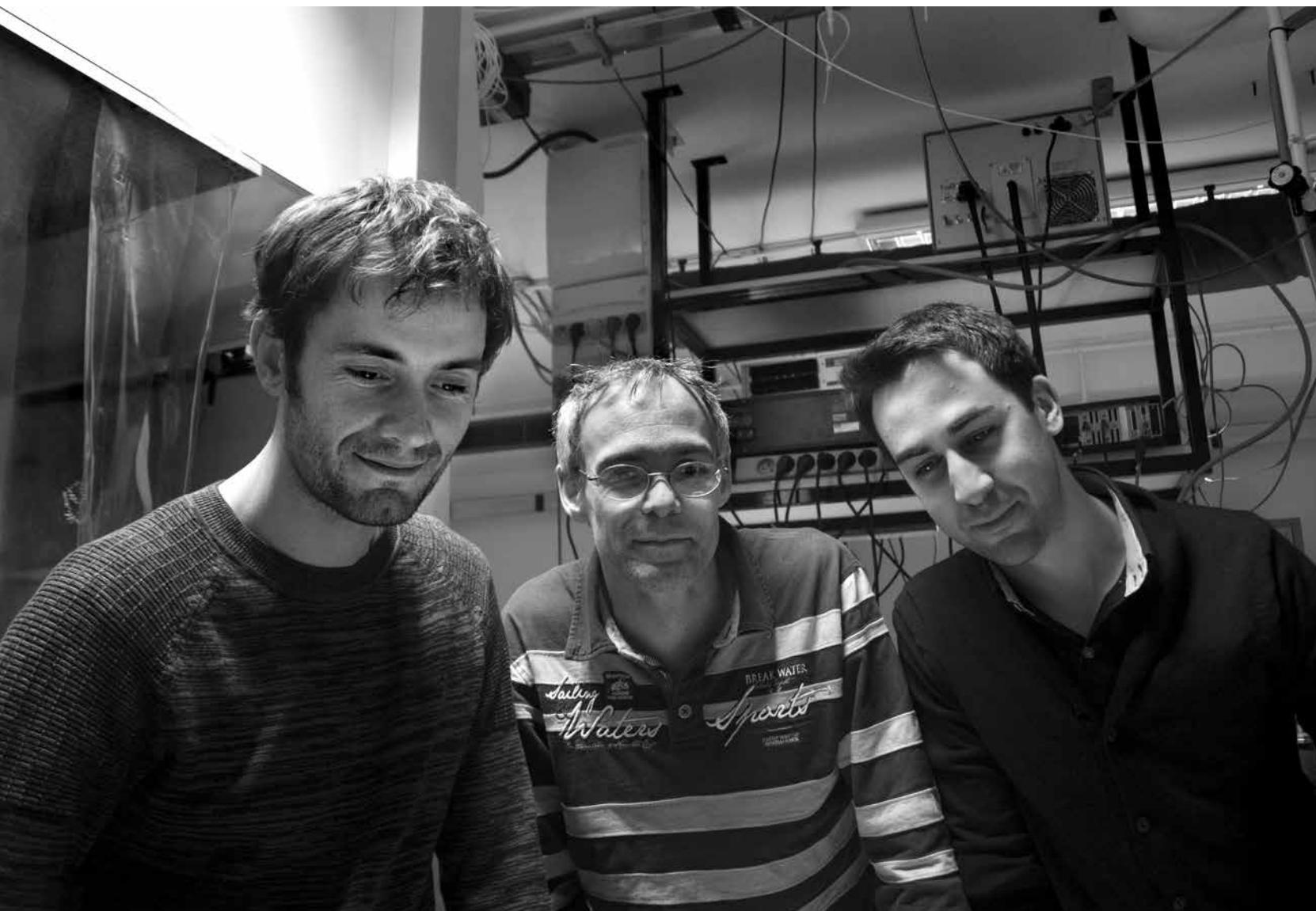
Jacques Robert



Molécules froides

Les enjeux sont de démontrer, pour les molécules, des méthodes fiables et versatiles de manipulation ayant une efficacité comparable à celles utilisées pour des atomes refroidis. Cela permettra d'effectuer des mesures physiques de grande précision, ainsi que des études de chimie contrôlée au niveau quantique. Notre dispositif a déjà permis de mettre en évidence un refroidissement de la rotation et de la vibration de certaines molécules. Nous nous intéressons maintenant aux molécules formées d'atomes possédant des charges électriques, donc des molécules avec un moment dipolaire électrique permanent, une propriété qui n'existe pas pour les atomes. Des interactions électrostatiques nouvelles sont donc attendues.

Nos recherches actuelles s'orientent vers le développement de techniques novatrices de ralentissement et refroidissement de telles molécules, que ce soit par champ magnétique, par laser ou par transfert de charge.



Laboratoire Aimé Cotton

Nadia Bouloufa

Olivier Dulieu

Maxence Lepers

Goulven Quéméner

Maurice Raoult

Théorie des molécules froides

Les particules quantiques polaires possèdent un moment dipolaire intrinsèque : électrique pour les molécules di-alcalines (KRb , $RbCs$, KCs), ou magnétique pour les atomes lanthanides (Er , Dy), ou les molécules formées d'atomes alcalins et alcalino-terreux (comme $RbSr$). Dans un gaz quantique ultrafroid, elles peuvent être contrôlées par des champs électriques ou magnétiques et par des réseaux optiques.

En développant des modèles théoriques et numériques poussés, l'équipe aborde toutes les propriétés de ces systèmes, souvent en étroite collaboration avec des équipes expérimentales de l'IFRAF ou internationales : les processus de formation de molécules par association d'atomes ultrafroids, leur structure électronique et leur spectroscopie, leurs interactions anisotropes à grande distance, leur dynamique collisionnelle en présence de champs électromagnétiques, conduisant à des réactions chimiques ultrafroides dominées par des effets quantiques, ou induisant des effets à plusieurs corps.





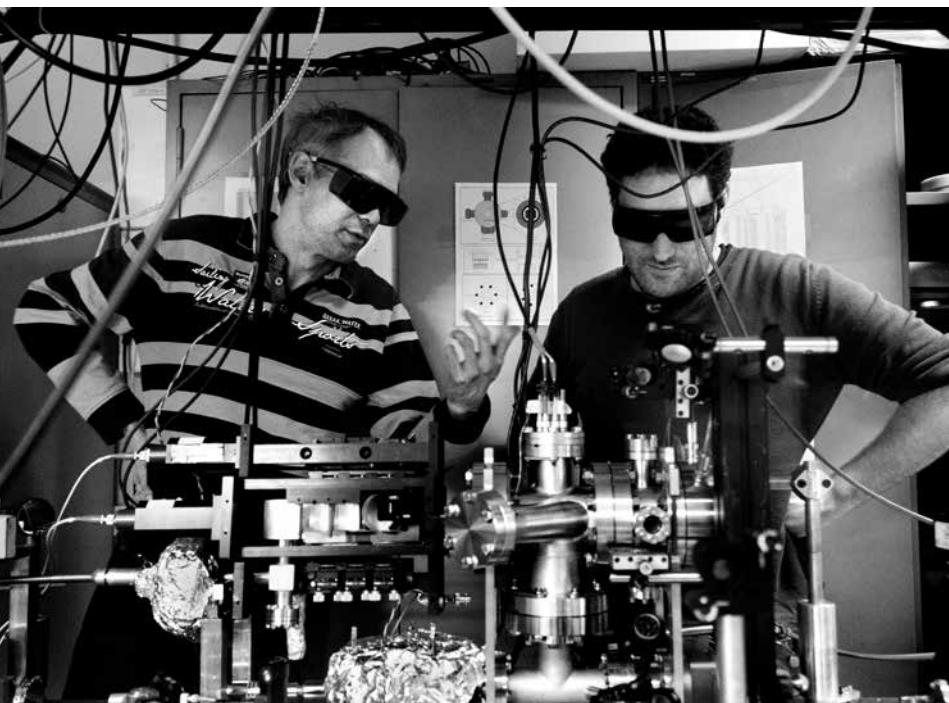
Laboratoire Aimé Cotton

Patrick Cheinet

Daniel Comparat

Pierre Pillet

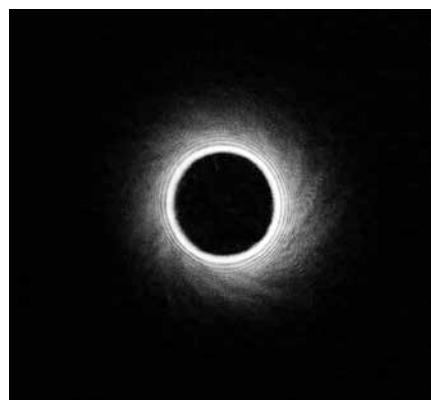
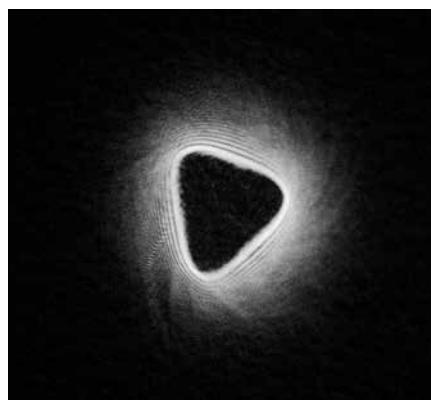
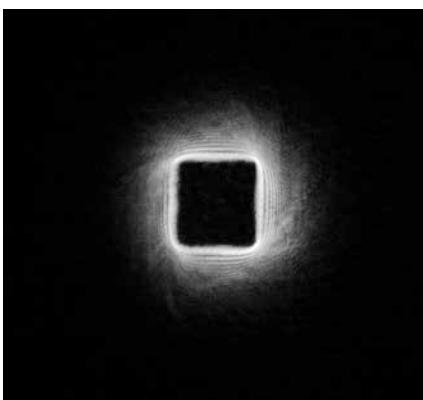
Électrons ultrafroids



Le projet a pour but de créer, à partir de l'ionisation d'atomes refroidis par laser, un nouveau type de source d'ions et d'électrons ayant une meilleure précision en position et vitesse que les sources actuelles. En effet, les ions ou électrons ainsi produits possèdent une agitation thermique très faible comparée aux sources chaudes habituelles. De plus, la taille relativement importante de la source permet de limiter les effets d'interactions entre les particules ce qui aboutit à une meilleure focalisation du faisceau. Afin d'augmenter le flux des particules chargées, nous avons orienté nos recherches sur la réalisation d'une source intense d'atomes de césum refroidis par laser.

Un enjeu important est de développer un prototype industriel de source d'électrons. Des applications en imagerie, spectroscopie ainsi qu'en chimie contrôlée par impact d'électrons sont envisagées.





Lumière «twistée»

L'interaction entre la lumière et les atomes est à la base du refroidissement et de beaucoup d'expériences de manipulation d'atomes reposant sur l'échange de moments entre la lumière et l'atome, le moment d'impulsion ou le moment de spin. Ainsi sont manipulées non seulement les variables externes comme la vitesse, mais aussi les variables internes comme l'état d'excitation de l'électron et son spin.

La lumière « twistée » se caractérise par un moment orbital angulaire non nul. Cette grandeur quantifiée permet de fabriquer des états de superposition de la lumière qui peuvent être échangés et stockés avec les atomes froids. De plus, les modes « twistés », de par leur forme annulaire, permettent de réaliser des pièges non dissipatifs originaux.



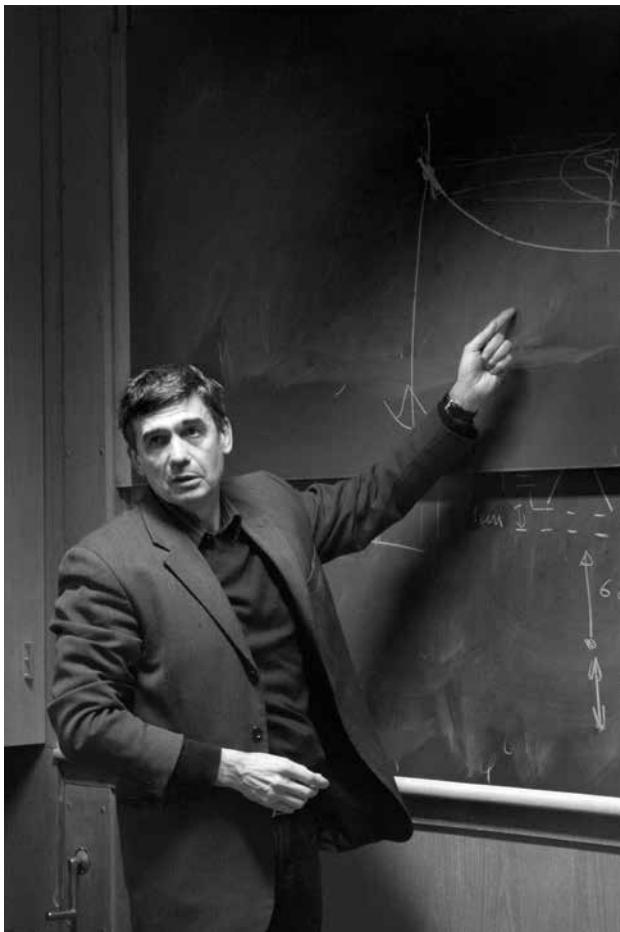
Laboratoire Aimé Cotton

Louis Cabaret

Daniel Comparat

Cyril Drag

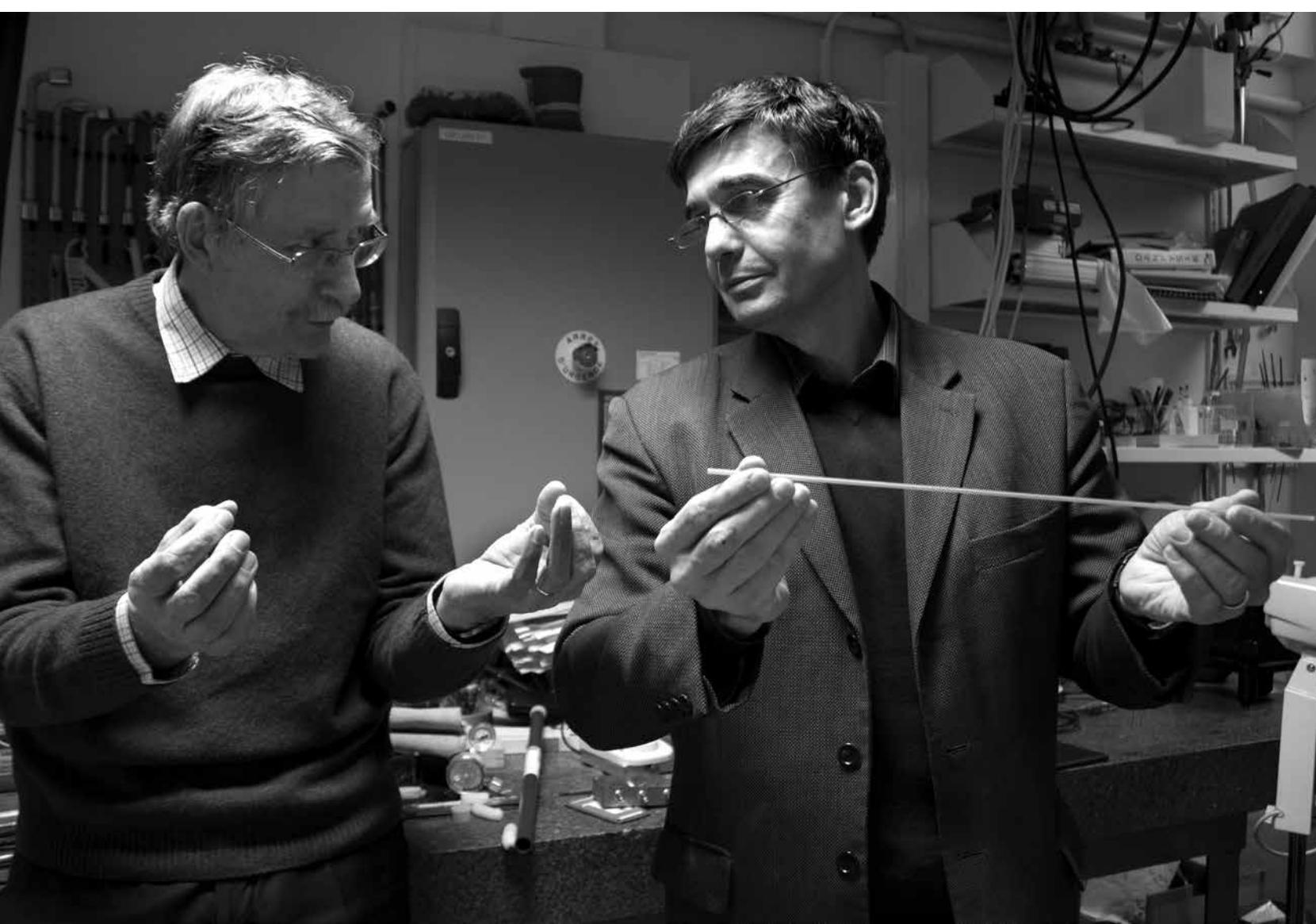
Jacques Robert



Lyman alpha

L'atome d'hydrogène (H) constitue le système atomique le plus simple, théoriquement complètement soluble. Cet atome est le plus abondant dans l'univers tout comme le rayonnement Lyman alpha qu'il émet. Il occupe une place primordiale pour la métrologie et pour l'étude de la chimie du milieu interstellaire. Cependant, il reste difficile à étudier, particulièrement à cause des transitions entre l'état fondamental et les états excités dans l'ultraviolet lointain.

Notre équipe travaille à réaliser une source laser transportable de très haute intensité et de haute résolution à la longueur d'onde de la raie Lyman alpha (121,6). Elle servira à produire de l'hydrogène froid pour la métrologie de très haute précision ou des mesures fondamentales sur les atomes d'hydrogène et d'anti-hydrogène avec comme objectif l'étude du principe d'équivalence par des mesures de gravité.



Les terrasses de l'IFRAF



La petite équipe administrative de l'IFRAF est née en 2007 sous l'impulsion de sa directrice Michèle Leduc. La secrétaire générale Françoise Tarquis, appelée à d'autres fonctions depuis septembre 2012, s'occupait du pilotage de toutes les réunions ainsi que de la communication. Le webmaster Alain Launay développe le site web de l'IFRAF et la gestionnaire Viviane Tia est en charge de toutes les opérations et justifications financières. Qui aurait pu croire qu'une petite équipe de trois personnes autour de Michèle Leduc pût s'enthousiasmer pour ce domaine scientifique si pointu : les atomes froids. Bien sûr, nous ne faisons que de l'administration et de la communication, mais nous avons accompagné la croissance de l'IFRAF qui, grâce à l'énergie des équipes de recherches, en partant d'un petit institut francilien, est devenu un institut de renommé mondiale, capable d'organiser de grandes manifestations scientifiques internationales comme ICAP 2012.

L'aventure a commencé par la surveillance de la construction des locaux sur les terrasses de la rue d'Ulm, puis le lancement du site web qui a connu un grand succès, avec plus de 250 000 visites depuis sa création et une moyenne de 250 par jour. La gestion d'un tel organisme est souvent homérique entre les règles strictes imposées par notre tutelle et le détachement des chercheurs vis-à-vis de l'administration. Mais la bonne volonté des uns et des autres a souvent aplani les difficultés. L'attribution des bureaux et la gestion de l'occupation de la salle de réunion, surtout depuis l'installation du système de vidéo-conférence, demandent parfois beaucoup de diplomatie. Mais les rencontres avec les jeunes doctorants, les post-docs et les chercheurs invités venus d'Australie, de Chine, des États-Unis, d'Europe ou de France, sont des expériences très enrichissantes qui font des terrasses de l'IFRAF un lieu d'échanges culturels sans frontières. Bref, un travail vivant, intéressant, une bonne entente, l'esprit d'équipe et le sentiment de contribuer au progrès du savoir, c'est ce qu'on appelle un beau métier !

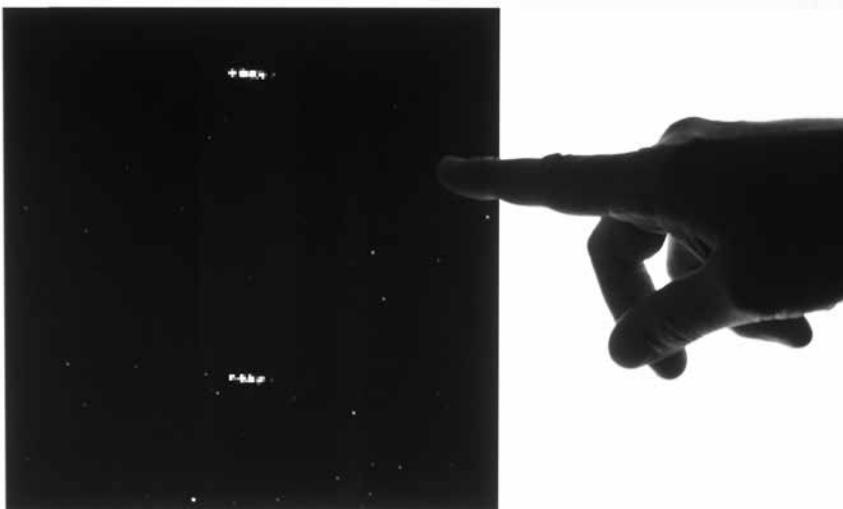
Viviane Tia



Ions piégés et qubits

Les ions piégés et refroidis par laser font partie des systèmes physiques qui permettent le meilleur contrôle d'objets quantiques individuels en interaction. En particulier, des dispositifs exploitant des ions piégés « adressés » par des faisceaux laser ont d'ores et déjà démontré toutes les opérations nécessaires pour pouvoir stocker et manipuler des morceaux élémentaires d'information (qubits en information quantique).

Notre équipe est engagée dans la fabrication et l'étude de pièges à ions miniatures réalisés par des techniques de microfabrication en salle blanche. Plus particulièrement, nous nous intéressons à comprendre et minimiser les couplages entre un ion Sr^+ froid et les surfaces métalliques des électrodes du piège. Ces couplages imposent actuellement une limite à une miniaturisation plus poussée (inférieure à 30 micromètres). Nous exploitons aussi la possibilité qu'offrent ces dispositifs de manipuler les qubits par interaction avec un champ proche micro-ondes.





Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques

Thierry Jolicœur

Patricio Leboeuf

Nicolas Pavloff

Dmitry Petrov

Guillalume Roux

Gora Shlyapnikov

Mikhail Zvonarev

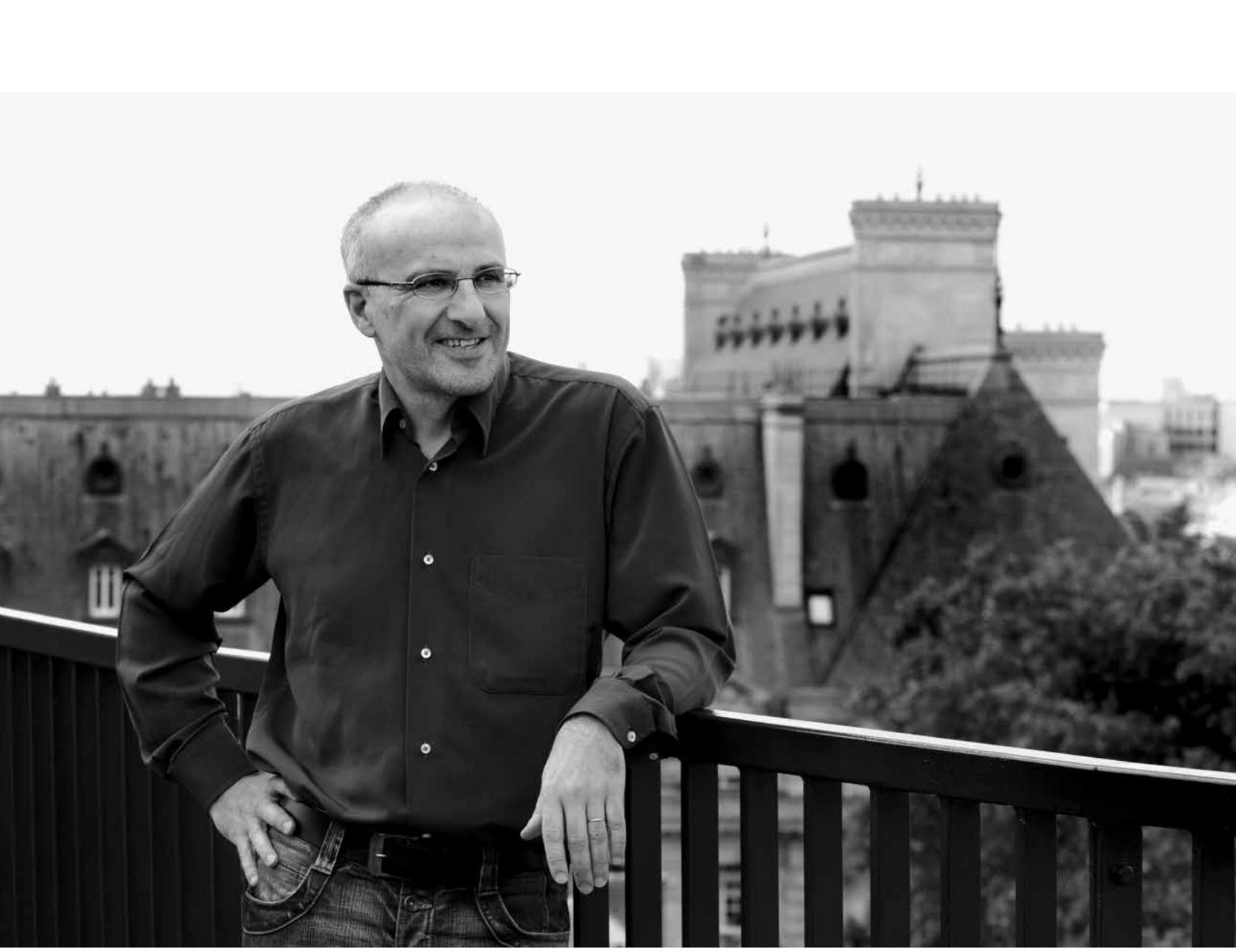
Problème à N corps

Nos recherches théoriques exploitent les possibilités offertes par les gaz quantiques ultrafroids dans lesquels on peut faire varier les interactions entre les particules ou choisir la dimensionnalité du système. Nous étudions les états quantiques topologiques à la base des futures technologies de calcul et de transport quantiques. Nous avons prédit l'existence d'un superfluide topologique stable de molécules polaires habillées par micro-ondes et la stabilité d'un gaz de fermions fortement corrélés dans l'état topologique de Pfaffian.

Nos études du transport quantique en présence de désordre ouvrent des perspectives sur de nouveaux nanomatériaux. Nous avons montré un phénomène dit de « refroidissement par chauffage » dans des réseaux unidimensionnels quasi périodiques de bosons et trouvé de nouveaux superfluides ayant des propriétés supersolides. Enfin, nous nous intéressons au rayonnement de Hawking avec des condensats de Bose.







Petites machines thermiques

Comment des atomes froids s'écoulent-ils entre deux réservoirs ? Quels sont les échanges de chaleur et d'entropie au cours de tels processus ? Comment peut-on éduquer des atomes froids à convertir de la chaleur en travail ou, au contraire, utiliser le travail fourni au cours du transport pour mieux refroidir encore ces atomes ?

Voici quelques questions que nous essayons de comprendre du point de vue théorique, en utilisant des méthodes analytiques et numériques. Nous cherchons aussi à prévoir de nouveaux phénomènes lorsque ces atomes interagissent fortement entre eux, ou sont soumis à des champs de jauge « artificiels » (par exemple l'analogie d'un champ magnétique bien plus élevé que celui que l'on peut appliquer aux électrons d'un solide).

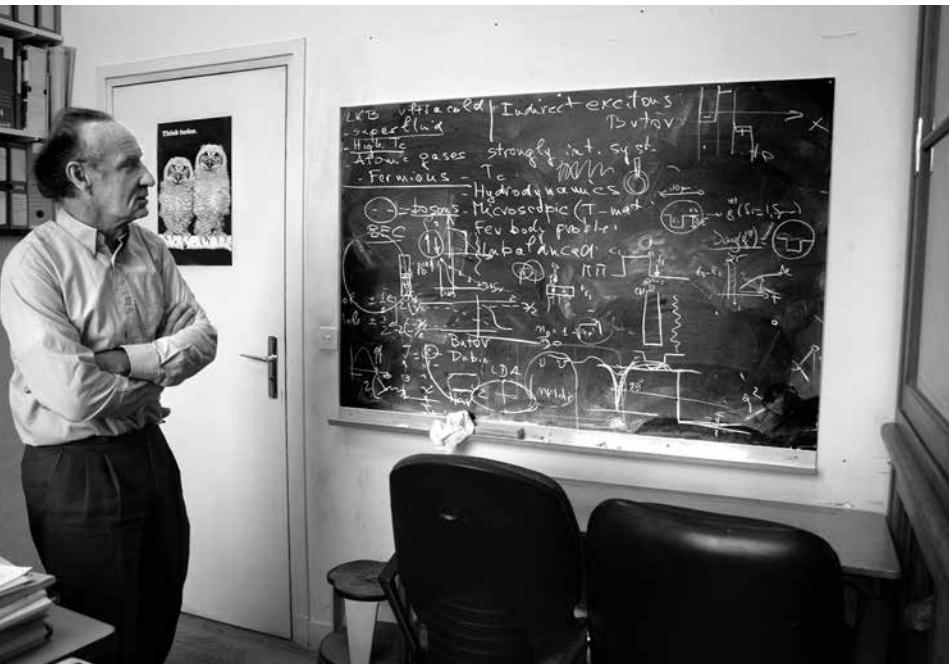
Centre de physique théorique
Collège de France - École polytechnique

Michel Ferrero
Antoine Georges
Leonid Pourovskii

Cellule informatique CPHT-CMLS
Jean-Luc Bellon
David Delavennat
Danh Pham Kim



Gaz fermioniques ultrafroids



Dans les cas où les interactions entre les atomes peuvent être rendues très fortes, les gaz froids posent des problèmes très analogues à ceux rencontrés en matière condensée, où l'interaction coulombienne entre électrons est toujours très forte.

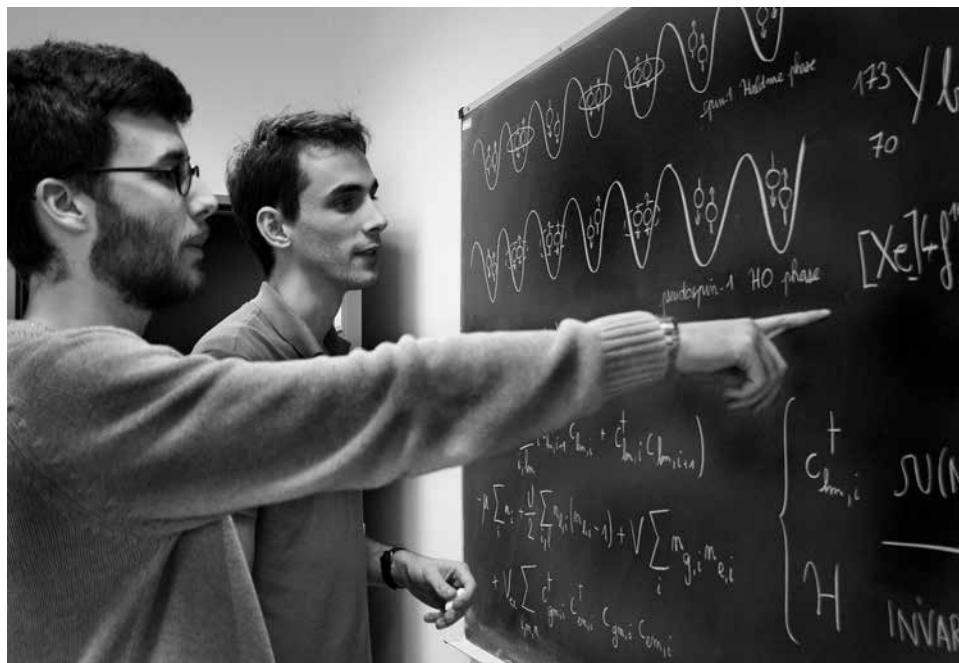
Avec les gaz froids, l'interaction effective est beaucoup plus simple qu'en matière condensée et, de plus, elle dépend d'un seul paramètre qui peut être mesuré et modifié à volonté. On peut donc espérer améliorer la compréhension de fond des systèmes en interaction forte de la matière condensée.

Le cas du polaron fournit un exemple intéressant par sa simplicité. En matière condensée, il s'agit d'un électron qui polarise le réseau cristallin environnant et est accompagné de cette déformation lorsqu'il se déplace. Cela modifie en particulier sa masse effective. Dans les gaz froids, de façon analogue, un atome placé en présence d'une mer de Fermi formée par d'autres atomes peut la polariser, donnant naissance à un objet baptisé polaron de Fermi. Nous avons pu calculer la masse effective de ce polaron avec une très grande précision, et ce résultat est en très bon accord avec les expériences.

Théorie quantique des champs

Les gaz d'atomes ultrafroids dans les réseaux optiques permettent d'étudier expérimentalement les phases quantiques de la matière condensée. Plus paradoxalement, ils ouvrent aussi la perspective de simuler des théories quantiques des champs de la physique des hautes énergies par le froid et les lasers.

Notre activité s'insère directement dans cette problématique en étudiant les phases quantiques d'atomes froids d'ytterbium qui permettent d'explorer la physique exotique liée à une symétrie $SU(N)$, fondamentale en physique des particules, notamment pour les hadrons et les scénarios de grande unification.



Laboratoire de physique théorique de la matière condensée

Patrick Azaria

Nicolas Dupuis

Jean-Noël Fuchs

Markus Holzmann

Ludovic Pricoupenko

Des atomes froids à la matière condensée



Les atomes froids permettent de réaliser des systèmes modèles de la physique du solide (gaz fermioniques en dimensions réduites, particules quantiques se déplaçant sur un réseau, etc.) et d'explorer également les fluides quantiques fortement corrélés dans des régimes sans équivalent en matière condensée « traditionnelle » (limite d'interaction résonante, mélanges fermions-bosons, bosons ou fermions avec nombre quantique de spin élevé, etc.). Nos travaux concernent essentiellement des systèmes caractérisés par de fortes corrélations (basses dimensions, voisinage de résonances de diffusion, réseaux...).

Parmi nos activités actuelles, citons par exemple le gaz de bosons bidimensionnels (thermodynamique et transition de Kosterlitz-Thouless) ; la transition superfluide-isolant de Mott d'un gaz de bosons bi- ou tridimensionnel dans un réseau optique (criticalité quantique et universalité) ; le gaz de fermions 1D à plusieurs composantes de spin (superfluidité exotique et analogie avec la QCD) ; l'effet Efimov ; le gaz de bosons en régime résonant.

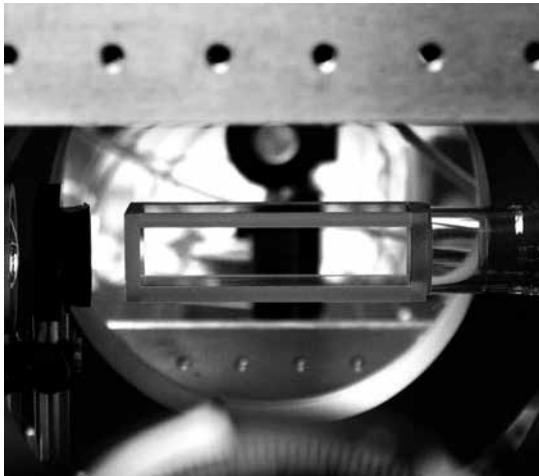
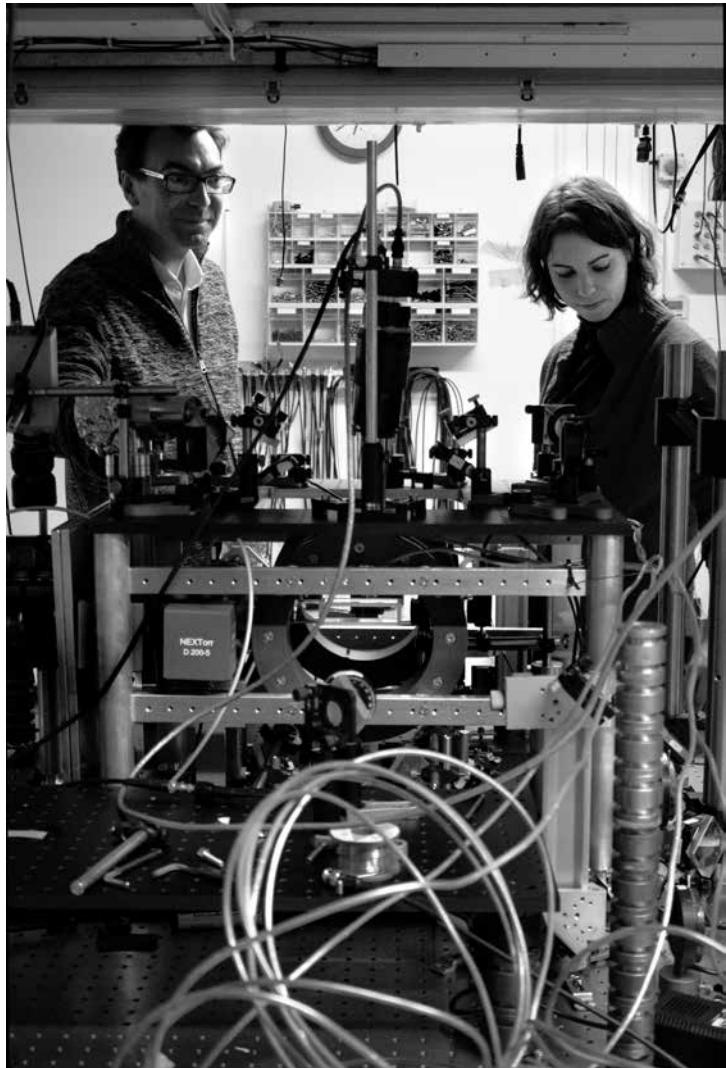


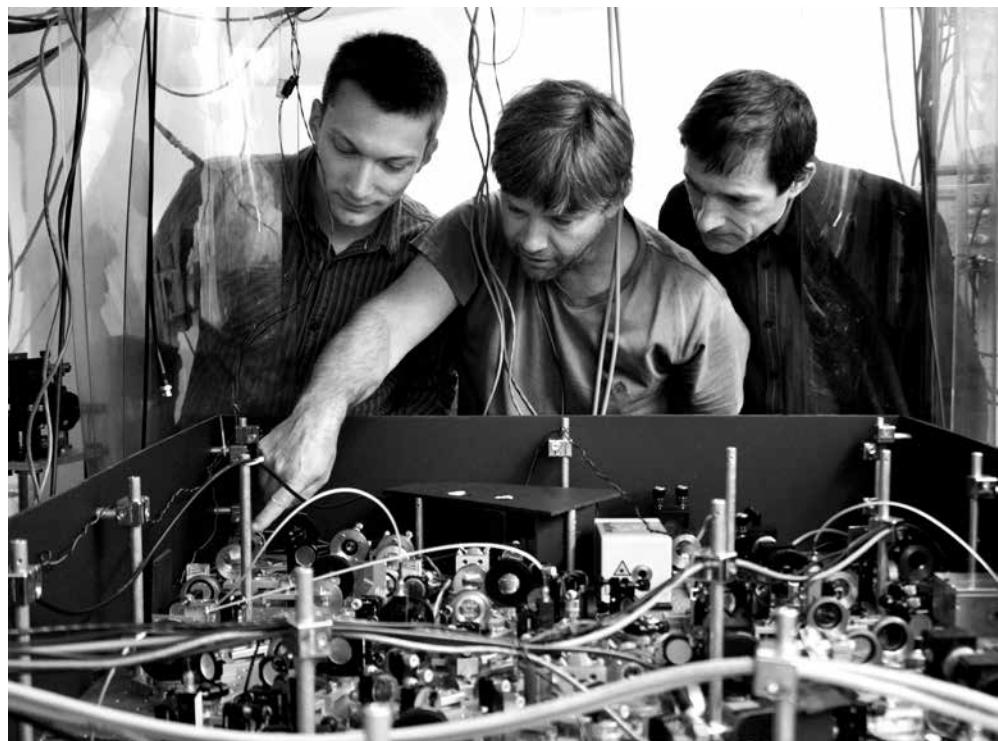
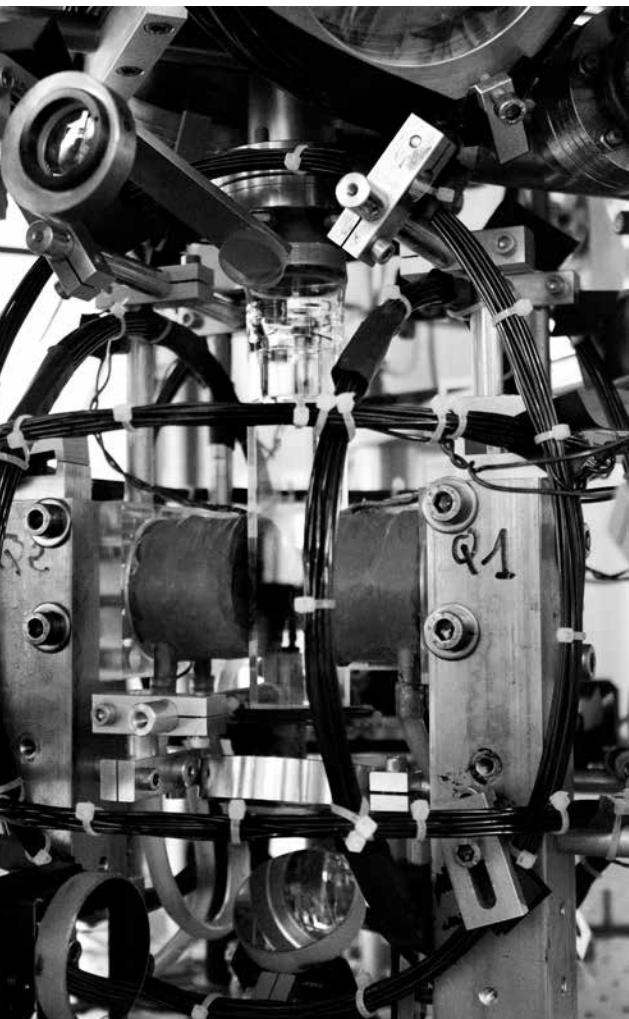


Le transport quantique

Notre recherche porte sur l'étude des systèmes quantiques complexes. Nous explorons la propagation d'ondes de matière atomiques dans des paysages énergétiques complexes et, le cas échéant, en présence d'interactions entre atomes.

Notre équipe aborde ce sujet grâce à des condensats de Bose-Einstein de rubidium. En façonnant les paysages énergétiques avec des faisceaux lasers, nous créons par exemple des situations où des comportements chaotiques sont susceptibles d'émerger, ou encore des configurations pour lesquelles des miroirs atomiques de réflectivité ajustable, i.e. des barrières tunnels, peuvent être réalisés. En combinant effet tunnel, chaos, désordre et interactions de manière contrôlée, nous souhaitons simuler des problèmes physiques initialement abordés en physique de la matière condensée.





Diffusion de la lumière

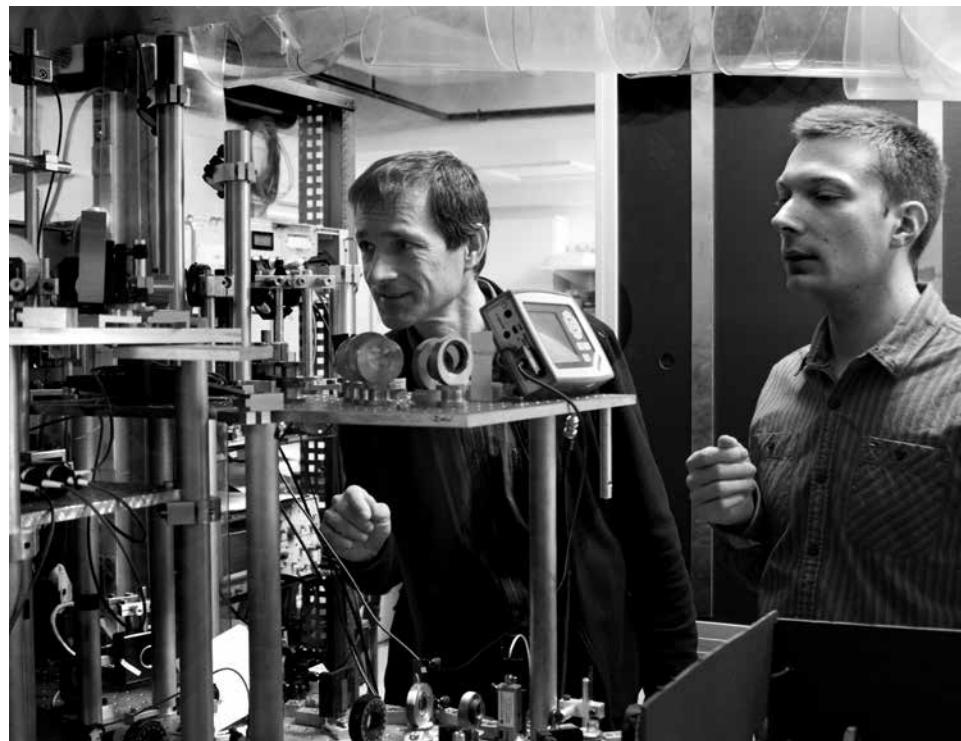
Les vapeurs atomiques permettent d'étudier dans des conditions idéales les propriétés de diffusion de la lumière.

Dans des vapeurs chaudes, nous avons étudié la diffusion anormale comme les vols de Lévy. Une expertise particulière de nos expériences concerne l'utilisation de grands nuages d'atomes froids pour étudier les effets d'interférence en diffusion multiple, les effets opto-mécaniques de la lumière sur les atomes froids ou encore le rôle de gain en régime de diffusion multiple. Les effets de diffusion multiple sont aussi étudiés avec les ondes de matière en utilisant un condensat de Bose-Einstein. Des approches numériques et analytiques, appliquées aux gaz quantiques et aux systèmes quantiques fortement corrélés, complètent sur le plan théorique l'expertise dans le domaine des atomes froids à l'INLN.

L'ensemble de ces études porte sur les phénomènes intervenant dans différents domaines de la physique, allant de la physique mésoscopique, de la matière condensée et de l'optique non linéaire à l'astrophysique – aux connections historiques avec la physique atomique et quantique.

Institut non linéaire de Nice Sophia Antipolis

Mathias Albert
Georges Batrouni
William Guerin
Frédéric Hébert
Robin Kaiser
Guillaume Labeyrie
Christian Miniatura
Patrizia Vignolo
David Wilkowski



Laboratoire de physique de la matière condensée de Nice

Olivier Alibert

Virginia D'Auria

Anders Kastberg

Laurent Labonté

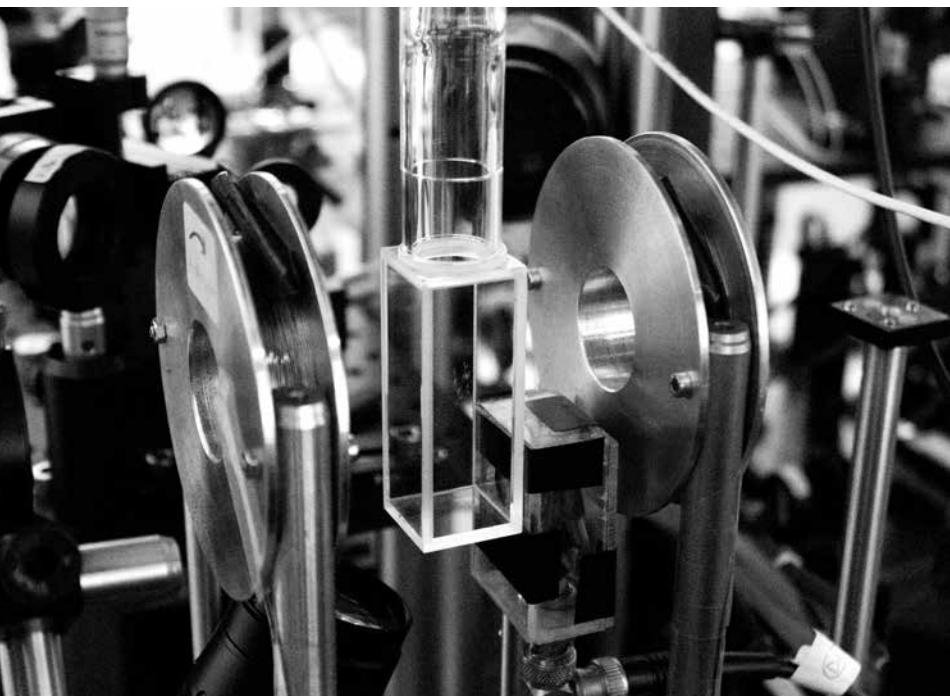
Sébastien Tanzilli

Des qubits dans les nuages

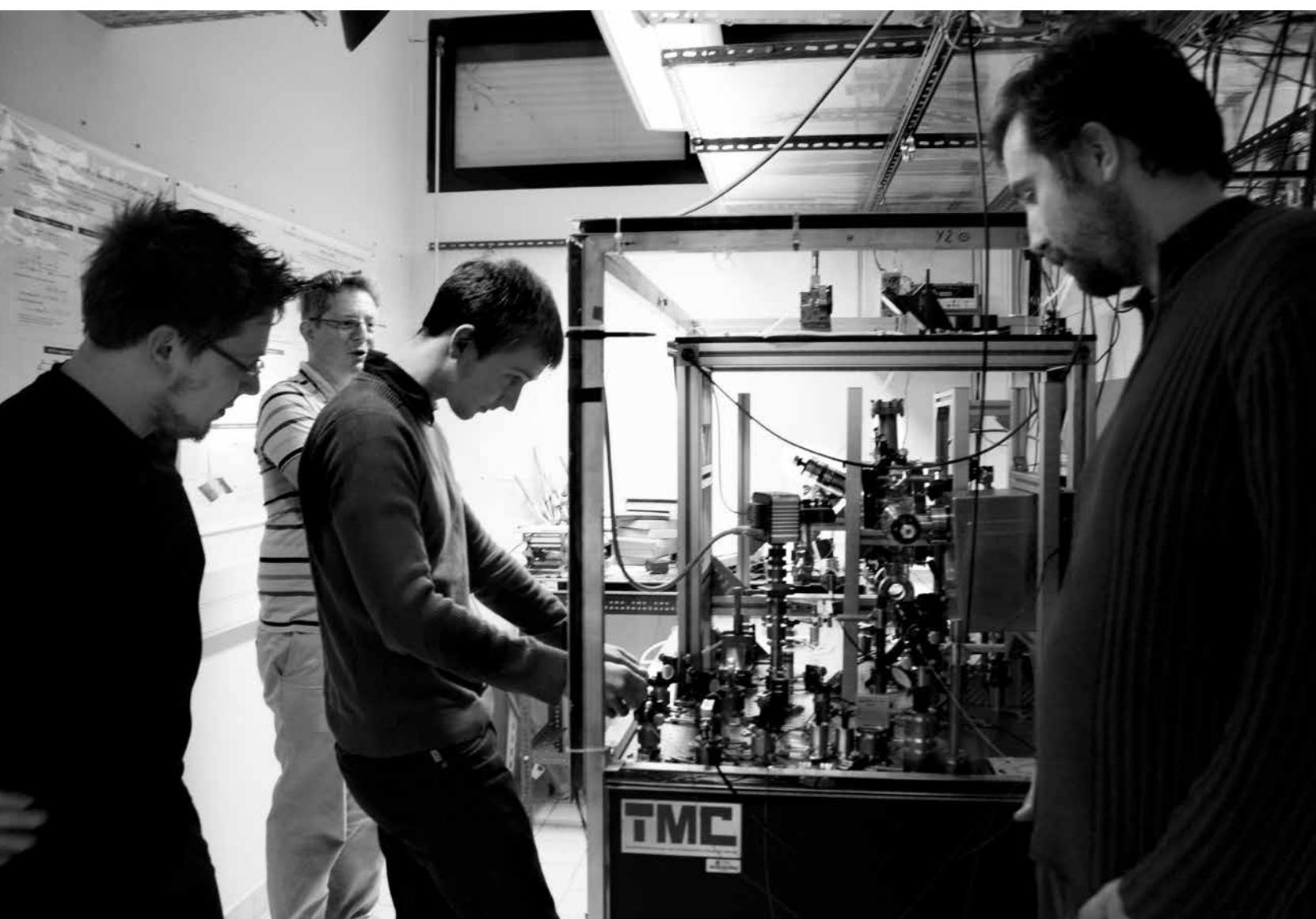
Notre équipe célèbre le mariage des atomes froids et de l'optique intégrée non linéaire. Nous produisons et manipulons des états non classiques de la lumière en jouant avec l'intrication des photons. Pour ce faire, nous développons des « puces » optiques intégrant plusieurs fonctions sur un même substrat de niobate de lithium.

Nous menons par ailleurs des expériences de refroidissement d'atomes (rubidium et césum) par laser, avec des objectifs de stockage de l'information quantique dans les gaz d'atomes froids et de simulation quantique dans des réseaux optiques. Notamment, lorsque que les photons préparés sur les puces rencontrent les atomes froids, les qubits « imprègnent » les gaz d'atomes de façon collective et sont stockés dans les nuages.

Le gaz peut aussi servir d'émetteur de photons uniques dits « annoncés » et constituer ainsi le cœur d'une expérience de téléportation. Ceci ouvre aussi la voie à l'intrication à distance de deux mémoires quantiques.







Mécanique quantique et chaos

Que se passe-t-il lorsque l'on associe mécanique quantique et chaos ? Trouve-t-on enfin de l'ordre dans le chaos ? C'est bien le cas en effet, du moins en partie. La dynamique chaotique va induire un très grand nombre de chemins possibles pour l'évolution du système. En parallèle, la mécanique quantique nous dit que ces chemins vont tous interférer entre eux. Comme les trajectoires sont chaotiques, la phase accumulée est aléatoire, les interférences sont, quant à elles, globalement destructives. Cela se traduit par un gel de la diffusion classique.

C'est ce que l'on observe dans une expérience de « rotateur frappé » où le nuage d'atomes est « percuté » par une onde laser stationnaire pulsée. Après un début de diffusion, l'énergie des atomes cesse de croître. De plus, ce phénomène s'est révélé, de manière surprenante, équivalent à celui de la localisation d'Anderson des électrons dans un système désordonné à température nulle.

Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules de Lille

Denis Bacquet
Radu Chicireanu
Jean-François Clément
Jean-Claude Garreau
Pascal Szriftgiser
Véronique Zehnlé



Postface



On sait refroidir des atomes jusqu'au milliardième de degré au-dessus du zéro absolu. On peut « attraper » ces atomes dans des pièges et ainsi étudier leurs propriétés fascinantes avec une précision sans précédent. S'ouvre un monde étrange, dominé par des lois « quantiques » qui stipulent qu'une particule est aussi une onde... Si la dénomination d'« atomes froids » ne dit pas grand-chose au public, voici près de dix ans qu'un institut portant ce nom existe en Île-de France et développe une belle vitalité scientifique. La cinquantaine d'équipes de l'IFRAF, toutes présentes dans ce livre, est riche de très nombreux doctorants et post-docs venus de tous les pays. Les expériences sont plutôt complexes, comme le montrent les tables couvertes d'optique photographiées ici ; leur charme est qu'elles conservent cependant une taille humaine et que chacun dans une équipe peut en maîtriser toutes les parties.

L'IFRAF a suscité le démarrage de projets de recherche de pointe avec une grande réactivité. Il a encouragé des liens de solidarité entre les groupes, évitant les compétitions inutiles. Il a

organisé des échanges de jeunes chercheurs avec d'autres réseaux en Allemagne, en Australie, en Inde ou en Chine. En France, sa thématique s'est enrichie d'un partenariat avec les nanosciences du réseau francilien NanoK. Notons aussi que plusieurs équipes hors Île-de-France ont été associées à l'IFRAF et sont présentées dans ce livre.

Le champ des recherches s'élargit sans cesse. Les gaz quantiques piégés dans des réseaux optiques permettront peut-être de mieux comprendre certains phénomènes complexes en matière condensée comme la supraconductivité. De nouveaux systèmes refroidis sont venus compléter la panoplie des objets d'étude : des molécules pour une chimie parfaitement contrôlée, des atomes de Rydberg géants, des ions piégés et même des polaritons. Et les atomes froids s'intriquent entre eux ou avec des photons, promettant des outils inédits à l'information quantique.

Enfin les applications des atomes froids sont de plus en plus spectaculaires ; celles pour la métrologie sont les plus avancées. Les meil-

leures horloges atomiques atteignent des précisions inimaginables et se miniaturisent. Une horloge à atomes froids se prépare à embarquer sur la station spatiale internationale pour des tests d'une précision inégalée de la relativité générale. Et des interféromètres à ondes de matière, compacts et fiables, commencent à voir le jour pour des utilisations pratiques en géophysique et comme capteurs dans l'espace.

Il y a plus de trente ans que le domaine des atomes froids s'est ouvert. Après la magnifique découverte de la condensation de Bose-Einstein en 1998, on s'attendait à voir l'excitation retomber assez vite. Or c'est le contraire qui s'est produit : le domaine est en expansion constante, il attire toujours une foule d'étudiants parmi les plus brillants. Les équipes de l'IFRAF forment un attelage dont la course n'est pas prête de s'arrêter.

Michèle Leduc

Translations

Page 4

Preface

In my time as a researcher, I have been lucky enough to live through two great adventures. First was the adventure of optical pumping, when I was a pupil at the École normale supérieure and was working for my diplôme d'études supérieures and my doctoral thesis, supervised by Alfred Kastler and Jean Brossel. I discovered what was then a new world for me, that of research, with exceptional leaders devoting all their time to young researchers in the laboratory, teaching them experimental techniques, showing them how to scrutinize a result, estimate an order of magnitude, formulate a hypothesis and test it. The optical methods of magnetic resonance, such as double resonance and optical pumping, were just being discovered and proved to be extraordinarily fertile, continually opening up new perspectives on the subject.

Nearly thirty years later, a second exciting adventure was beginning in the same laboratory, that of cold atoms. At first, very few groups around the world were working on the subject. One needed first of all to understand how light can exert a force on atoms and to study the limits which quantum fluctuations exercise on these forces. Our group, at the Kastler Brossel laboratory, had only two doctoral students and four researchers, Alain Aspect, Jean Dalibard, Christophe Salomon and me with a few visitors from abroad. It began to become apparent that the cooling techniques

were more efficient than expected, that effects studied several years before, such as light shifts or dark resonances, were able to play an important role. A few years later, the Bose Einstein condensate was observed in gases of Rubidium, Sodium and Caesium.

The research area then underwent a spectacular development. In the United States, a new institute was created, the CUA (Center of Ultracold Atoms), combining the efforts of researchers at Harvard and MIT working in this field. There were attempts to create a similar body in the region of Île de France, where several teams were beginning to work on these subjects. Hubert Curien, at the time president of the Scientific advisory board of the region, had completely understood the importance of what was at stake. He invited me to give a presentation to the advisory board and convinced it to create IFRAF. This body, directed by Michèle Leduc, whose commitment and energy we all learnt to appreciate, played a decisive role in uniting the efforts of numerous young researchers who today work in France on cold atoms and constitute a genuine community. Photos of many of these young researchers are in this book. More than from any learned exposition, the enthusiasm which radiates from these photos and the accounts which accompany them suffice to show the role which IFRAF has played in setting up and uniting such a dynamic community.

Claude Cohen-Tannoudji

Page 7

The paradoxes of extreme cold

Cold atoms physics is a place of paradoxes. Pivotal to this research topic is the idea that a laser beam, which would burn our finger if we were careless enough to touch it, traps particles at a temperature a billion times lower than room temperature.

A second paradox is that this extreme cold, far from being a dull state of eternal rest, instead opens the doors of a rich quantum universe, where waves and particles act in a joint play. Then there is the surprise, for the casual visitor, to see a subtle form of order emerge from laboratories crowded by swarms of cables and pipes, on optical tables covered with equipment arranged without apparent logic.

The avenues of research that we are exploring extend this paradoxical aspect of ultracold gases. We want to use our atoms to simulate phenomena related to intense magnetism, arising either from orbital motion or from spin, even though our atoms have no electric charge and have no more than a weak magnetic moment...

Page 8

The Majorana particle

Dysprosium is an atom with an unusual arrangement of electrons around its nucleus. If its electrons are excited in a controlled manner by a laser beam, we can modify the way in which the atom moves around: the speed of the atom is thus related to the state of its electrons.

Such atoms manipulated by laser could form new phases of matter. We aim to create a superfluid gas of atoms in which certain of the atoms

interact to form a particle called a “Majorana bound state”. Majorana particles, unlike all particles known to date, do not belong to either of the established categories, bosons and fermions. We aim to verify this exotic property of Majorana particles.

Page 10

Equations of state

One of the specialties of the Fermi gas group is the quantitative study of thermodynamic properties of strongly correlated quantum gases. We have developed an experimental technique based on the analysis of in situ images of clouds of atoms which allows us to measure the equation of state of the gas.

For fermions undergoing attractive interaction, the equation of state clearly reveals the existence of a superfluid phase with a phase transition of the first or the second order, depending on whether the spin of the fermions is strongly or weakly polarized.

We have also performed studies of resonant Bose gases and have revealed the so-called Lee-Huang-Yang quantum corrections, which were predicted by calculation for the first time fifty years ago but had never been observed before.

Page 13

Mixed spaces

The Ultra-cold Fermions group has recently developed a new kind of experiment with mixtures of fermionic quantum gases, leading to new physical situations, both in the few-body and in the N-body physics. The apparatus is based on trapping and cooling Lithium 6 and Potassium 40

atoms, whose resonances are sufficiently distant from one another to unable their independent manipulation by optical fields.

In particular we wish to explore the phase diagrams of fermions in mixed dimensions where one of the species propagates in ordinary space (3 dimensions) while the other species propagates in 2, 1 or 0 dimensions.

Page 14 **Smart chips**

The concept of “atom chips” combines two of the most active research fields of experimentation in present day physics: quantum gases and nanotechnology. The general idea of atom-chips is to use nanostructures (whether electronic, optical or otherwise) to trap and manipulate ultra-cold atomic gases. The result is systems with new and promising properties, of both fundamental and applied interest. With our chips, we can now trap not only atoms but also light. To do that, we have developed a new technology, Fabry Perot cavities using optical fibres. In this way, we now have at our disposal a veritable quantum laboratory on a chip which opens new vistas of research. For example, we use photons which have been trapped in the cavity to prepare entangled quantum states in the atomic gas. These states have astonishing and possibly useful properties, notably for improving the measurement of time and for navigation systems.

Page 16 **Entangled states and quantum gases**

A remarkable manifestation of the quantum properties of very low temperature atomic gases is the Bose-Einstein condensate, in which

a macroscopic number of atoms share the same wave function. Our theoretical group is interested in the coherent properties of these condensates, which are to matter what the laser is to light. In particular, we study the case where the condensate is composed of pairs of fermionic atoms, like the paired electrons found in a superconductor.

Another subject close to our hearts and more directly linked to application is the use of cold atoms to create entangled states which have potential uses in metrology. An example of this comes from spin-squeezed states, recently obtained with bimodal Bose-Einstein condensates which may let us improve the precision of atomic clocks.

Page 19 **Photons in cavities**

Superconducting mirrors allow us to make an almost perfect “photon box” which traps microwave photons. Rydberg atoms act like extremely sensitive probes, which, for example, let us observe again and again the same trapped photon, without destroying it.

We can use these to realize some of the thought experiments conceived by the founding authors of quantum physics in order to illustrate its strangest aspects. We can, for example, explore the frontier between the quantum world where the famous Schrödinger cat can be both dead and alive at the same time, and the world of classical objects which surrounds us.

It is by using ultra-cold Rydberg atoms, which interact over an extended period of time with photons in a cavity, that we plan to develop these experiments.

Page 20

Eliminating boundaries

When quantum gases meet nanotechnology...

We know today how to trap light in high finesse cavities between two optical fibres terminated by highly polished mirrors. In the same way one can also trap atoms, or other quantum solid systems. Small clouds of cold atoms can thus be transferred into such cavities from an atom chip where electrical currents through wires create the trapping fields. In this way one prepares entangled atomic states, which opens up attractive perspectives for quantum communication and metrology. From the nanoworld one can dream of yet to be discovered applications of cold atoms...

Michèle Leduc

Page 21

When the Île-de-France Region urged us to merge, combining the “nano” of the C’Nano IdF and the “cold atoms” of IFRAF within a new DIM (Domain of Major Interest), the task seemed complicated... C’Nano IdF and IFRAF were based on well-established structures going back several years, with size and style of management that were quite different from one another. There is almost a ten-fold difference in the number of researchers in our respective networks, and the themes of IFRAF are very much centered on physics and its technological applications, while those of C’Nano IdF cover a vast multi-disciplinary field, stretching from chemistry through biology to the human sciences. Nevertheless, once we had passed through a slightly tense period of negotiations aiming at putting a common structure of governance in place, the linkage process of the two domains became rather fruitful. We have

learnt to understand and appreciate one another in less than two years. Nowadays, mutual confidence is the norm, the atmosphere in the steering committee is excellent and we even have a pile of interdisciplinary projects in common. For example, how to trap cold atoms on a nanometer scale chip, how to couple a trap of cold atoms to a mechanical nano-membrane, how to do chemistry with cold atoms, and so on.

Sylvie Rousset

Page 23

The unitary limit

One of the most unusual aspects of cold atoms, perhaps the most fascinating, is the possibility that laboratory conditions might reach the regime where interaction within the gaseous phase is greatest, the famous unitary limit. At this limit, for atoms colliding at an arbitrarily slow speed, the effective atomic size is virtually infinite and in any case much greater than the range of the van der Waals force and than the typical distance between interacting atoms.

Our team of theoreticians is exploring the new possibilities offered by these systems and is trying to surmount the obstacles to its implementation. New effects are at work, giving birth to an infinite number of three body states and even to four body states which we recently predicted and which came as a great surprise for such a short-distance interaction. New approaches are being developed such as the diagrammatic Monte Carlo method where a computer samples a very large number of terms from the perturbative series, i.e. Feynman diagrams, which we have successfully confirmed in our experiments.

Page 25

Testing electrodynamics

Our team makes high precision measurements (Hydrogen spectroscopy, measurement of the Lamb shift in muonic Hydrogen and determination of the fine structure constant). This aims at testing predictions of Quantum Electrodynamics (QED) at high precision by comparing experiment and theory and also at improving the adjustment of fundamental physical constants which is orchestrated by CODATA. (The Committee on Data for Science and Technology)

For the determination of the fine structure constant, the principle is to measure the speed at which a Rubidium atom recoils when it absorbs a photon. More precisely, we measure how the atom recoils when it absorbs and reemits a thousand identical photons with well-known energies. This change in speed is of the order of 6 m/s and we have measured it with a precision of 6 nm/s. We have determined the fine structure constant to more than 9 significant digits, then compared this value to another measurement based on the study of a physical property of the electron (its ‘anomalous moment’) measured by another group. Agreement is better than one part per billion so that these two results give the best test to date of QED.

Page 27

Ion traps

Our team is developing a system for cooling Beryllium ions with a 313 nm laser. The Be⁺ ions are used for “sympathetic cooling” of simple ionic species which cannot be directly cooled by laser.

The emblematic ion which we cool is H₂⁺, the most simple of molecular ions. Doppler-free

two-photon vibrational spectroscopy allows for direct optical determination of the proton to electron mass ratio mp/me, with an uncertainty of less than one part in ten billions, better than that found by combining fundamental constants.

The system will also make it possible to cool multiply charged ions for preliminary tests on QED and upstream studies to predict their performance in atomic clocks of the future.

Protocols for the sympathetic cooling of low mass ions are very important for the GBAR project that aims to measure the effect of gravity on antimatter for which very slow atoms of anti-Hydrogen are produced from the anti-matter ion H⁺.

Page 29

Optomechanics and cold atoms

Can a macroscopic object such as a pendulum or a mechanical resonator exhibit a quantum behavior? Answering this question is one of the challenges addressed by quantum optomechanics, a new field of research that aims to couple light and micro or nano-resonators through the effect of radiation pressure.

This requires the resonator to be cooled down to temperatures somewhat similar to the one of cold atoms. Coupling a cloud of cold atoms to a mechanical resonator appears as an efficient approach to the measurement and control of a mechanical device, as it gives access to a powerful quantum toolbox.

Our research group is carrying out such an experiment with a cloud of cold atoms set in the standing wave reflected by a suspended photonic-crystal nanomembrane, which also behaves like a movable mirror. This system could allow

for efficient cooling of the membrane and opens the way to new hybrid platforms for quantum information.

Page 30

Quantum optics and semi-conductors

At the interface between optics and the physics of semi-conductors, quantum well microcavities undergoing interaction with a laser have let us see both quantum optic effects and quantum fluid effects.

In the regime of strong coupling between light and matter, the system is described by mixed exciton-photon states known as cavity polaritons which are interacting bosons. We have demonstrated their propagation as superfluids and the Cerenkov effect in a polaritonic fluid created by laser excitation. We have also demonstrated a reduction of quantum noise in the emitted light. Similarly, we have created a pair of dark hydrodynamic solitons, as well as half-solitons in a spinor quantum fluid of polaritons.

Page 33

Quantum memories

With quantum data it is difficult to make a memory, in other words the equivalent of a hard disc or a USB stick, because we need to store the quantum bits (qubits) without reading them (which would destroy them.)

In order to store a photon and to recover it on demand, we use ensembles of cold atoms, prepared in a magneto-optical trap. They absorb the photon, which puts them in a state that is a copy of the state of the photon. With these millions of atoms, the photon has a strong probability of being absorbed and the excitation is completely delocalized.

Our group has shown for the first time that one can store in these cold atoms a qubit that is encoded in the orbital angular moment of the photon and recover it with excellent fidelity. If polarization is the basis of storage, only one qubit can be encoded in a photon, but orbital angular momentum makes it possible to have access to an infinite basis. Using this new medium, the next stage is to record dozens of qubits carried by a single photon.

Page 34

Vacuum fluctuations

For quantum physicists, vacuum is never truly empty. In the absence of any matter and at near-zero temperature, empty space still has irreducible quantum fluctuations called vacuum fluctuations. The interaction of these fluctuations with objects placed in the vacuum becomes apparent as forces acting on these objects or as changes in the energy levels when atoms or molecules are involved.

We study various aspects of these interactions which are generically named Casimir physics, that is the physics of observable effects created by vacuum fluctuations on different objects. The latter can be atoms, molecules, nanoparticles or solid surfaces. Consequences of the interaction of atoms and molecules with quantum vacuum are crucial in numerous situations relating to the physics of cold atoms or of nano-objects in confined geometries. They lead for example to quantum reflection phenomena which enable antihydrogen atoms to avoid being annihilated when they approach solid surfaces.

Page 35

Atomic mist

When the sun shines on a cloud, light is scattered by droplets of water and this scattered light is itself scattered again by other droplets. Eventually, light goes in all directions: that is why, in thick mist, we cannot see where the sun is.

If we replace the cloud of water droplets by a thick cloud of ultra-cold atoms, quantum interference effects come into play and can produce a new phenomenon: Anderson localization. In this situation, light remains trapped for a long time in the cloud rather than eventually escaping. Cold atoms being also matter waves, we can play the game of exchanging the matter waves and light waves, that is localizing atoms in a disordered light wave. In this new scenario, the tendency of ultra-cold atoms to undergo collective behavior may create hitherto unseen situations, with interplay between multiply scattered waves, disorder and particle interactions.

Page 36

Photon-photon interactions

Legend says that on the front of the temple of Delphi were engraved the three maxims “know thyself”, “nothing in excess” and “promises are close to dishonesty”. The project DELPHI, “Deterministic Logical Photon/Photon Interactions”, aims to implement logical operations between quantum bits (qubits) conveyed by photons.

Photons make excellent qubits because they can very accurately transmit information, encoded in their state of polarization for example. On the other hand, it is very difficult to perform logical operations between photons, because even when

they meet, there is no interaction between them. A physical mediator must therefore be found which allows two photons to interact, in order to perform a generic quantum logical operation.

In the DELPHI experiment, the mediators are atoms in highly excited energy levels, called Rydberg levels. The photons temporarily couple with these atoms, forming a composite system called a “Rydberg polariton”. These polaritons interact very strongly via their atomic component, and then photons are regenerated with a memory of this interaction. From this simple idea there emerges a very complicated experiment whose aim is that one day, some photons will speak with other photons...

Page 38

Manipulating atoms

Our team studies the behavior of a small number of interacting cold atoms. In our experiments, the atoms are trapped in tightly focused laser beams, called “optical tweezers”.

We can arrange the tweezers in lattices (square, circular, hexagonal...) and trap exactly one atom in each tweezer. Using lasers, we excite the atoms into states, called Rydberg states, where an electron is very far from the nucleus (the atom is practically the same size as a bacterium!). This gives the atoms giant dipoles so that they can interact at distances as great as 10's of micrometers. By controlling these interactions, we prepare atomic states that possess strong quantum correlation (entanglement), useful for quantum information or metrology tasks, or quantum simulation.

We can also trap about a hundred atoms in a single tweezer and study how light is scattered by the very dense cloud that results. The light

induces atomic dipoles that interact and we study the influence of these interactions on the scattering of light. This very familiar phenomenon (responsible for blue sky, for example) remains very poorly understood when the atoms interact.

Page 41

A brief history of the Atomic Optics Group

Founded in 1993 by Nathalie Vansteenkiste, Robin Kaiser and Chris Westbrook, our group addressed initially atomic mirrors as first topic. We embarked in explorations of dilute Bose Einstein condensates from 1996 onwards, when Philippe Bouyer joined us. From the beginning, important support from CNRS allowed us to draw on the talent of electronic engineers, Stéphane Martin then Frédéric Moron and André Villing. In 1997 we got our first results in the field of one dimensional condensates and atom lasers while we were launching a project on atom interferometers with SYRTE. Beginning as fundamental research, this led to the creation of the Muquans start-up, launched by several researchers trained in our group, including Bruno Desruelle, the CEO. Philippe is today continuing research on atom interferometry at the Institut d'Optique in Bordeaux, while Isabelle Bouchoule is delving into the study of one-dimensional condensates on atom chips.

In 2005 we began work on Anderson localization, launching our atoms into a disordered potential created by laser speckle. We explored the subject in parallel with Massimo Inguscio's group in Florence, with theoretical support from Laurent Sanchez-Palencia. Today there are two experiments, overseen by Vincent Josse and Thomas Bourdel, which can be thought of as

quantum simulations of this "difficult problem" of condensed matter.

As soon as 1997, we have started a project on cooling and trapping of metastable Helium atoms (He^*) and in 2001 the thesis of Antoine Browaeys led to the first condensate of a metastable atom. The possibility of detecting these atoms individually led us to the idea of "quantum atom optics", based on the measurement of functions of correlations. In this way we can revisit with atoms the major features of photonic quantum optics: the Hanbury Brown and Twiss effect, generation of correlated pairs... The initial team of Chris Westbrook and Denis Boiron today works with Marc Cheneau on the atomic Hong-Ou-Mandel effect, while David Clément is developing an experiment on optical lattices.

Thanks to IFRAF, our group has then been able to launch several new themes, including problems issued from condensed matter physics, but even in these we have kept our culture of AMO physicists. Atom optics has evolved in a radical manner since its beginnings more than twenty years ago and it is more lively and full of promise than ever.

Page 43

The brightness of condensates

Helium has a long history in quantum physics as evidenced by the discoveries of superconductivity and superfluidity. Our team uses this same atom but in an electronically excited state in order to carry out research on Bose-Einstein condensates and their use as coherent sources of matter waves. Just as for a coherent source of light (the laser), the brightness of the condensate can lead via non-linear effects to remarkable quantum correlations between several atoms. The great potential of

metastable Helium is that its internal energy can be used to detect individual atoms by the multiplication of electrons. This technique allows us to monitor a cloud of atoms in three dimensions to detect correlations between the atoms.

Page 44

Disorder in two-dimensional gases

Disorder is an almost inevitable feature in condensed matter. It often plays an important role but modelling it is complicated. An ultra-cold gas can be used as a quantum modelling system, particularly for the study of superfluidity, an extraordinary property that stems from the quantum nature of matter. Here, we use it as a modelling system to study the effects when we add disorder in a controlled fashion using speckle.

The two-dimensionality is critical for Anderson localization: all the one-particle quantum states are localized but at a length which increases exponentially with their energy. It is also in 2D that the competition between superfluidity and disorder is at its most intense, as can be seen for example from the superconductor-insulator transition in metallic films. By controlling the strength of the disorder and of interactions, feasible in a cold gas of Potassium atoms, we can make detailed studies of these phenomena.

Page 47

Anderson localization

Our team studies the quantum propagation of matter waves when there is disorder.

We launch atoms that have been frozen to a very low temperature across a disordered field created with light in order to produce extremely well controlled systems which simulate complicated

systems where many questions remain unanswered. More specifically, we study nowadays the astonishing and counter-intuitive phenomena which stem from Anderson localization. Here, the effects of quantum interference between different scattering paths combine to cause the propagation of particles to stop dead, transforming an *a priori* conductor into an insulator.

More than fifty years after its discovery, our experiments aim to give a reply to unanswered questions on this veritable paradigm of condensed matter physics.

Page 48

Quantum matter theory

The mysteries of quantum physics crystallize in large part around the domain of condensed matter where quantum coherence and interactions between particles together give rise to spectacular phenomena such as superfluidity, superconductivity or localization in disordered media. Today, ultra-cold atoms open up a new dimension on these themes by providing not only very well controlled systems but also new approaches.

In our team, we are conducting theoretical studies on the behavior of ultra-cold quantum matter by combining analytic and numerical approaches. In particular, we hope to understand how disorder and quantum correlation determine the dynamics of these systems. How does the competition between imperfections of the substrate and interaction between particles determine superfluidity in these systems? What influence does dimension have? How does information propagate in these systems? When an isolated quantum system has been taken far from equilibrium, how does it evolve towards a state that seems in equilibrium?

The spectacular progress of recent years has made it possible to lift one corner of the veil but many of these mysteries remain yet to be elucidated.

Page 51

One dimensional boson gases

When an electric current passes through a micrometer-sized channel deposited on a substrate, an “atom chip”, one can obtain very large magnetic field gradients. The atoms, whose magnetic dipole interacts with the magnetic field, can be very strongly confined under these conditions. In particular, it is possible to reach one dimensional geometry, confining the atoms along the micro-wire and freezing their transverse degrees of freedom.

Using Rubidium atoms, this is how we are conducting experiments to study one dimensional boson gases. The physics of these systems is very different from the physics in two or three dimensions. For example, the phenomenon of the Bose-Einstein condensation does not occur. The interactions between atoms play a very important role, and there is a “fermionized” phase in which the gas acquires fermionic properties. We have studied this system in detail, concentrating particularly on fluctuations of atomic density.

Page 52

A collective effort

A laboratory is the setting for a scientific voyage of discovery shared by many. Each experiment is the fruit of an idea, of the intuition of one or several researchers who have themselves found their inspiration elsewhere, alongside others. People work together, they set things up, change their

minds, and a few years later, there is no way to know who did what. Difficult to remember why?

In this process, the interns, the doctoral students, the post-docs, all have a particular role. They are at the same time apprentices and fully fledged researchers, often drawn by the hope that they might better understand and tame the quantum dragon. They enthusiastically take in the ideas of more senior workers and they bring their own ideas. They believe in them, perhaps more than they should. And the result is that things work out, thanks to them. Often late into the night, while most of us sleep....

In what will soon be 10 years, a few hundred students, interns or post-docs have contributed to different projects in teams within IFRAF. The names of them all do not appear in this book. But each discovery is based on their work and their inventiveness. In return, the laboratories of IFRAF have helped give birth to a generation of scientists trained in modern techniques of scientific experimentation, and fully conscious of the puzzling nature of quantum physics, and of the mysteries we have yet to resolve.

Bruno Laburthe-Tolra

Page 54

Cold atoms clocks

Mastering time has always been essential to humanity, not least to predict the hunting season or when to sow crops. Nowadays, atomic clocks co-ordinate social life, economic exchanges and global navigation systems.

Clocks based on a fountain of cold atoms were the first instruments to benefit from laser cooling. Together with the first fountain primary clock

constructed at SYRTE, a dozen similar ones operate worldwide to steer the atomic international time with the exceptional accuracy of 1 second in 100 million years.

Beyond this service to the public, the extreme sensitivity of these clocks allows high precision measurements on quantum physics, or fundamental physics tests such as the Einstein equivalence principle and possible variations of the fundamental constants. Aiming towards industrial applications, the SYRTE also develops innovative compact clocks using either ambient temperature atoms or ultra-cold atoms.

Page 57

Down to the second

Optical atomic clocks tick at frequencies of the order of a million of billions of oscillations per second, and greatly surpass commonly used microwave atomic clocks.

Our team aims to extend the ultimate level of performance of optical clocks and of the related methods. Among these methods are femtosecond frequency combs, used to make measurements with optical clocks, and coherent optical links, used to compare distant clocks, both via optical fiber or through free space. Our team also work on all applications enabled by the extreme level of performance of these clocks: redefinition of the second and connection with the microwave domain, investigation of atomic properties, tests of fundamental physical laws and of Einstein's general relativity, participation in the space mission ACES/PHARAO and also, the measurement of the Earth's gravity and its applications to Earth Sciences.

Page 59

Give time a break

Time needs to take its time, as everyone knows.
So who's marking time?

Today it's the «Quanticle» sung by Caesium atoms, tomorrow by other atoms

Time needs a break.

No need for the atoms to hurry, they should be turtle or, even better, sloth,

That's the way to get the best clocks.

Best! For what?

Things which now seem commonplace: what's my GPS telling me, what's up on my smartphone?

Things for science, for fundamental issues.

The relativistic world and the quantum world which just won't mix.

The atom is quantum but inhabits classical time.

An avenue which transcends boundaries...

One approach, try comparing time from clocks in different places, over a long period,

We feel the need to give time a break

Between Earth and space, that's the ACES mission.

In space, the slow atoms of PHARAO,
On the ground, a wide range of clocks,
Between them signals run back and forth.
When?

Space is a hard one, but its time will come
2016 should be just the beginning.

We feel the need to give time a break.

Page 60

Inertial sensors

Our team exploits a fundamental but always surprising property of matter, its dual character: atoms, which we can move around with lasers,

behave not only as particles but also as waves, susceptible, as in optics, of undergoing interference phenomena. We are using this wave-like character to make a new generation of inertial sensors based on cold atoms, whose performance already exceeds conventional instruments in some aspects.

We work on the modeling, the development and the metrological study of cold atom instruments. Our objective is to get this new technology to break out from existing performance limits.

These accelerometers, gyroscopes and other force sensors are simultaneously ultra-sensitive and precise and they have applications in many areas, running from fundamental physics through geosciences to inertial navigation.

Page 62

Time and gravity

The BIARO experiment, a project launched by the IFRAF in collaboration with Philippe Bouyer and Arnaud Landragin, traps Bose-Einstein condensates at the heart of a very high finesse cavity then makes precise measurements on the quantum state that results without perturbing it or destroying it. This makes it possible to measure, for example, the state within an atomic clock without affecting its precision, giving a way to improve its performance.

The ICE experiment exploits the wave-like property of atoms kept at a very low temperature, at which one talks not so much of atoms as of waves of matter. Here, two types of atom, Rubidium (Rb) and Potassium (K), are used simultaneously to make two accelerometers based on matter waves and these are put in an Airbus which reproduces the conditions of space. In this way, we can very precisely measure if the two atoms feel the

same weight and thus verify the weak equivalence principle postulated by Einstein.

Page 64

Towards an absolute quantum gravimeter

Muquans is a newly formed high technology company, created in 2011 and embedded in the Institut d'Optique d'Aquitaine at Bordeaux. Based on research activities led by SYRTE, at LP2N and LCFIO, it aims to develop a new generation of high precision instruments based on laser-cooled atoms.

The principle aim of µQuanS is to develop an absolute quantum gravimeter. This instrument is part of an extension of the MINIATOM project supported by the IFRAF. The work which we are leading aims to deliver an instrument capable of measuring gravity with a sensitivity close to 10^{-9} g which will be transportable (75 litres, 50 kg) and entirely autonomous. It will address various markets in applied geophysics. (Vulcanology, seismology, hydrology and the exploitation of underground resources...) We are also working on the development of a Rubidium atomic clock with a long term stability close to 10^{-15} .

Finally, we are taking the technologies developed for these instruments and using them to launch solutions specifically intended for the manipulation of atoms by laser. We are consequently partners in the MIGA project (Matter-wave Interferometer Gravitation Antenna), in which we are responsible for the laser trapping and cooling system.

Page 66

Transparent chips

The potential applications of cold atoms led

the Thales group to launch, several years ago, an experimental activity in this field in collaboration with the ENS, SYRTE and the Institut d'Optique.

We chose to explore atom chips, which have a strong potential for system integration. In collaboration with 3-5 Lab, we have developed transparent chips on a SiC substrate. Our experimental apparatus (with which we obtained our first condensate at the beginning of 2014) is intended for the spatial separation of coherent internal states of Rb 87 using microwave field gradients.

The aim is to make the interferometer as symmetric as possible, in order to have it function with non-condensed atoms, the objective being to reduce the effects of interactions which are harmful for the phase measurement.

Page 68 **Know-how**

To build a cold atom experiment, begin by assembling a chamber and empty it of air until an ultra-high vacuum is obtained, typically one hundred thousand billion times less dense than Earth's atmosphere. Next, insert into this chamber a tiny vapor of atoms, for example by heating a solid, sometimes up to 1 500°C. Finally, use laser beams to cool this vapor: do this by adjusting the laser frequency so that the atoms only absorb light when they are travelling in the opposite direction to that in which the beam propagates. In a fraction of a second, the temperature of the atoms promptly reduces to just a few millionths of a degree above the "absolute zero" of temperature, -273 °C.

Once the atoms are cooled, they can be trapped far from the walls of the chamber using a

combination of magnetic fields, electric fields and laser beams. They can also be trapped in the vicinity of nanostructures produced in a cleanroom or in optical cavities formed by almost perfectly reflective mirrors. Precision measurements which one may perform with cold atoms also go hand in hand with the development of ultra-stable oscillators and ever more refined servo controlled techniques.

Cold atoms are thus based on various technologies including lasers, extreme vacuum, fast electronics and precision optics, and computer systems engineered to control each stage of the experiment and the exploitation of the results. These techniques have been developed both in experimental rooms and in laboratory workshops, which play an extremely important role in research of this type with great experimental complexity.

Bruno Laburthe-Tolra

Page 70 **Optical links and temporal frequency**

The latest atomic clocks have impressive stabilities and accuracies so that they are ideal tools for highly sensitive measurements in the most diverse domains. But how should these ultrastable signals be transferred between laboratories?

We have successfully transmitted a clock signal over some optical fibers of the internet network without introducing any signal degradation. The transferred signal is at least ten thousand times more stable than that of GPS. We are now working on the development of a fiber network on a French scale and a European scale: what should be the architecture? How should the signal be transmitted over very large distances? Would such a network act like a giant fiber gyrometer? In the

short term, these developments will make possible comparisons between the best European clocks.

Page 72

Molecular probes

With molecules, it is possible to perform experiments to test fundamental physics, which complement those using atoms. Molecules have richer structure and are thus potentially more sensitive to certain effects, notably those arising from symmetry breaking. They could also allow for improved measurements of fundamental constants.

In our group, we are developing new experimental apparatus for probing molecules in very tightly controlled conditions using laser spectroscopy. This has allowed us to measure the Boltzmann constant, in view of the future redefinition of the temperature unit.

In a different experiment, we are also looking to measure a violation of the parity symmetry in molecules, a feeble effect that has so far eluded detection. Its observation is thus a real experimental challenge.

Page 75

A chip for the Soup

The universe just after the Big Bang is often described as a soup of extremely hot particles that are rapidly cooling due to the expansion of its volume. On the quantum scale, this dramatic cooling could have been responsible for a brutal change of the quantum phase in which the particles were. This phase transition would have been so violent that tiny topological faults (holes for example) would have appeared within this soup. According to certain cosmological models, these

faults would explain the spatial organization of matter throughout the universe that we know.

In our team, we are trying to simulate such transitions of phase by laboratory experiments, the aim being to contrast the experimental results with the theoretical models. At the heart of the apparatus is an atom chip within which sodium atoms can be cooled and moved around by magnetic micro-traps. Hence a cloud of microscopic atoms might help us elucidate the first moments of the entire Universe.

Page 76

A two-way superfluid

If as a general rule we avoid running in circle when we want to make scientific progress, matters are quite the opposite in this experiment. When trapped in a tube bent back on itself in the form of a ring, atoms of ultracold rubidium become superfluid. A superfluid is a gas or a liquid (like liquid helium at very low temperatures for example) which can flow without friction against the walls of the chamber by which it is contained. In this situation the gas can therefore go round and round almost indefinitely, confined to the ring by magnetic fields and laser beams. Superfluidity is a quantum property of a moving gas: it follows that the speed at which the gas flows can only take certain values authorized by quantum mechanics.

It is therefore possible to imagine preparing a quantum state where the superfluid flows both one way and the other at the same time, a sort of Schrödinger's cat with two heads that could have applications for quantum computing or precise measurements.

Page 79

When atoms are magnets

Chromium atoms are strongly magnetic. They interact over long distances by dipole-dipole interactions, exactly as if they were (quantum) magnets. A cold gas of Chromium atoms is therefore a useful and unusual system for the study of magnetism.

Recently, for example, we have used stationary waves of light to trap these atoms in a periodic potential: the atoms line up spontaneously into an artificial crystal. Each atom at each site in this network is a magnet, coupled to all its neighbors by virtue of dipolar interactions. Our experiments therefore let us study magnetism in the quantum domain, and demonstrate strong analogies with the physics of condensed matter.

If the fundamental principles of the origins of magnetism have been well established for approximately one century, the magnetic properties of materials are in general very difficult to explain, due to their extreme complexity. For example, some of the most burning questions in condensed matter physics bear on the link between magnetism and superconductivity or on frustrated magnetism. It is this type of questions that our Chromium atoms may allow us to explore.

Page 80

Nanometry

How can an electromagnetic field be seen on a scale shorter than the wavelength of light? It is to this question that the use of nanometer-sized atomic wave packets of metastable Argon may give some answers. In effect, metastable atoms act as exceptional detectors, because they can be resolved simultaneously in time and in position

thanks to the emission of an electron when the atom reaches the detector. This makes it possible to measure directly the diffraction picture of a slow atomic beam (between 10 and 30 m/s) once it has passed through the potential created by the field under study. The advent of nanotechnology poses questions about the possibility of coupling between cold atoms and the electromagnetic fields generated by these nanostructures.

There is a particular magnetic field configuration that can also imitate the effect of negative index on atoms and this offers novel prospects for interferometry and metrology.

Page 83

Cold Rydberg atoms

Rydberg atoms are “giant” Hydrogenoid atoms, excited in a large principal quantum number that can reach 100 or more. They possess very “exaggerated” properties: they interact with each other a hundred billion times more than atoms in the fundamental state. Our team produces Rydberg atoms cooled by laser (“frozen giant atoms”) and in different ways takes advantage of their very long distance dipole-dipole interactions.

In one activity we use Caesium to study what are called Förster resonances, controlled by an electric field, which makes it possible to isolate few particles effects where N-body phenomena dominate: the aim is to study super-radiance and the implementation of quantum gates. In another activity, we are setting up a project based on Ytterbium atoms where one electron will be excited into a Rydberg state while another will serve as the laser control of the atom

Page 84

Cold molecules

What we want is to demonstrate reliable and versatile methods for manipulating molecules that are as effective as those used for cooled atoms. This would enable to perform very precise physical measurements, such as studies on chemical reactions controlled at the quantum level. Our apparatus has already allowed us to cool the rotation and vibration of certain molecules. Now we are interested in molecules formed from the electrostatic attraction between oppositely charged ions, which means that they have a permanent electric dipole, a property that doesn't exist in atoms. That is why we expect to see novel electrostatic interactions.

Our latest research is leading us to develop novel techniques for slowing and cooling these molecules, using magnetic field, laser or charge transfer.

Page 86

A theory for cold molecules

Polar quantum particles have an intrinsic dipole moment: electric for di-alkaline molecules (KRb , RbCs , KCs) or magnetic for lanthanide atoms (Er , Dy) or for molecules formed by alkali-metal and alkaline-earth atoms. (like RbSr) In an ultra-cold quantum gas, they can be controlled by electric or magnetic fields and by optical lattices.

As it develops advanced theoretical and numerical models, the team examines all the properties of these systems, often in close collaboration with experimental teams from the IFRAF or abroad. These include the formation of molecules by association of ultra-cold atoms, their electronic structure and spectra, their anisotropic long dis-

tance interactions and their collision dynamics in the presence of electromagnetic fields. The team thus investigates controlled ultra-cold chemical reactions that are dominated by quantum effects, or exhibiting many-body effects

Page 88

Ultracold electrons

The aim of the project is to use atoms cooled by laser, then ionized, to create a new type of source of ions and electrons whose position and speed is more controlled than with existing sources. In fact, the ions and electrons that are produced have very little thermal motion compared to the usual hot sources. Furthermore, the large size of the source produces small interactions between the particles such that the beam can be more tightly focused. In order to increase the flux of our charged particles beam, we have concentrated our research on making an intense source of Caesium atoms cooled by laser.

An important issue is to develop an industrial prototype of the electron source. The expected applications are in imaging, spectroscopy and in chemical reactions controlled by electron impact.

Page 91

Twisted light

The atom-light interaction is the basis of cooling process and manipulation of atoms. It relies on momentum exchange between light and atom, i.e. the kinetic momentum and the spin one. These exchanges handle not only the external variables of the atom such as the velocity, but also the internal variables such as the quantum state.

The «twisted» light carries a non-zero orbital angular momentum in addition. This momentum

is a quantized variable, and can be used to produce combinations of light states in order to be exchanged and stored in cold atoms. Furthermore, twisted light modes have annular shapes adapted for creating non-dissipative traps having particular forms.

Page 92

Lyman alpha

The Hydrogen atom (H) is the simplest atomic system and its equations are in theory completely soluble. This atom is the most abundant in the Universe as is the Lyman alpha radiation which it emits. It plays a primordial role in metrology and the study of interstellar chemistry. Nevertheless, it is difficult to study, particularly because of transitions between the fundamental state and excited states in the deep ultraviolet.

Our team is working towards a transportable source that has very high intensity and high resolution and emits at the wavelength of the Lyman alpha ray (121.6). It will permit the production of cold Hydrogen for very high precision metrology or fundamental measurements on atoms of Hydrogen and anti-Hydrogen, the objective being the study of the equivalence principle by measurements of gravity.

Page 94

IFRAF Terrace

The small team which administers the IFRAF was founded in 2007 by its director Michèle Leduc. Our secretary general Françoise Tarquis, who has moved on to other duties since September 2012, took care of all the meetings and of public relations. Our webmaster Alain Launay manages the IFRAF website and Viviane Tia is the

manager in charge of all financial operations and accounting documents. Who could have thought that a small team of just three people around Michèle Leduc could have such enthusiasm for such a scientifically stringent field as this: cold atoms? For sure, we do no more than management and public relations, but we have taken part in the growth of the IFRAF which, thanks to the energy of its research teams, has grown from a small local institute to one known throughout the world, important enough to organize major scientific conferences such as ICAP 2012.

In the beginning, this adventure involved supervising the construction of premises overlooking Rue d'Ulm, then setting up the website which has been a great success with more than 250 000 visits since its creation and an average of 250 per day. The management of such an organization is often Homeric between the strict rules imposed by our supervisory body and detachment of researchers with respect to the administration. But goodwill between one and the other has often smoothed out any difficulties. Assigning offices and the management of the meeting room, especially since the installation of the video-conferencing system, sometimes needs lots of diplomacy. But it is a very enriching experience to meet young doctoral students, post docs and invited researchers coming from Australia, China, the USA, Europe and France, and the IFRAF terrace is without comparison a place of cultural exchange without borders. Put simply, when work is lively and interesting, when there is mutual understanding, team spirit and a sense of contributing to the discovery of new knowledge, that's what anyone would call a great job!

Viviane Tia

Page 96

Ion traps and Qubits

Laser-cooled trapped ions are among those physical systems that give the best control of individual quantum objects undergoing interaction. In particular, devices based on trapped ions addressed by laser beams have demonstrated all the operations that are needed to store and manipulate elementary quantum bits of information (“Qubits” in the jargon of quantum computing).

To go one step further, our team is working on the fabrication and study of miniature ion traps built in a clean room environment. More specifically, we want to understand and minimize couplings between a cold Sr⁺ ion and the metallic surfaces of the trap. At present, these couplings are the bottleneck towards more ambitious miniaturization (<30 microns). We are also using the capabilities of these miniaturized devices to manipulate Qubits through interaction with a near-field microwave radiation.

Page 98

N-body problem

Ultracold quantum gases characterized by tunable interparticle interactions and dimensionality, offer unique possibilities for creating novel many-body states. The realization of these possibilities in theory and transfer them to experiment is the main goal of our research. A broad spectrum of our activity is first of all related to topological quantum states promising for protected quantum computation and to quantum transport, which form a basis for future quantum technologies. We have already predicted the existence of a stable topological superfluid of microwave-dressed polar molecules and described the stabilization of the strongly correlated

topological Pfaffian state of fermions.

The research on quantum transport is focused on cold atoms in various types of disorder, which is promising for the creation of new nanomaterials, and we have already found an anomalous “freezing with heating phenomenon” for one-dimensional bosons in quasiperiodic lattices. The studies are also related to revealing novel superfluids manifesting supersolid properties, and to Hawking radiation in Bose-condensed systems.

Page 101

Miniature heat engines

How do cold atoms flow between two reservoirs? What exchanges of heat and entropy are there during such a process? Can we use these exchanges between heat and work to cool atomic gases even further?

These are just a few questions which we are trying to understand from a theoretical point of view, using analytical and numerical methods. We seek also to predict new phenomena when there are strong interactions between these atoms, or when they experience “artificial gauge fields”. (For example the analogue of a strong magnetic field, much higher than that which can be applied to electrons in a solid.)

Page 102

Ultracold fermionic gases

When atomic interactions can be made very strong, cold gases raise problems very similar to those found in condensed matter physics, where the Coulomb interaction between electrons is always very strong.

With cold gases, the effective interaction is much simpler than in condensed matter and fur-

thermore, it depends on a single parameter which can be measured and modified at will. Hence one may hope to improve the fundamental understanding of strongly interacting systems in condensed matter.

The polaron gives an interesting example because of its simplicity. In condensed matter, the standard polaron corresponds to an electron polarizing the surrounding crystalline lattice and followed by this deformation as it moves. This modifies in particular its effective mass. Similarly in cold gases an atom, in the presence of a Fermi sea formed by the other atoms, can polarize it, resulting in an object called a Fermi polaron. We have been able to calculate the effective mass of this polaron with very high precision and the result is in excellent agreement with experiment.

Page 103

Quantum field theory

Gases of ultra-cold atoms in optical lattices let us study experimentally the quantum phases of condensed matter. More paradoxically, they also make it possible to simulate quantum field theories in high energy physics using cold and lasers.

Our activity falls directly within this area and involves the study of the quantum phases of cold atoms of Ytterbium which makes it possible to explore the exotic physics linked to a $SU(N)$ symmetry which is fundamental to particle physics, notably for hadrons and grand unification scenarios.

Page 104

From cold atoms to condensed matter

Cold atoms make it possible to construct model systems of solid-state physics (including

fermionic gases in reduced dimensions, quantum particles moving in a lattice, etc.). They also make it possible to explore strongly correlated quantum fluids in regimes with no equivalent in “traditional” condensed matter (e.g. the limit of resonant interactions, fermion-boson mixtures, bosons or fermions with a high quantum spin number, etc.). Our work is mainly concerned with systems characterized by strong correlations (low dimensionality, scattering resonances, lattices...).

Examples of our recent activities are as follows: two-dimensional Bose gas (thermodynamics and Kosterlitz-Thouless transition); Mott superfluid-insulator transition of a two or three dimensional Bose gas in an optical lattice (linked to quantum criticality and universality); one dimensional fermionic gases with several spin components (exotic superfluidity and analogies with QCD); Efimov effect; Bose gas in a resonant regime.

Page 106

Quantum transport

Our research involves the study of complex quantum systems. We are exploring the propagation of matter waves in complex energy landscapes, including in the presence of interaction between atoms.

Our team addresses this topic using Bose-Einstein condensates of Rubidium. For example by shaping laser beam intensities, we create situations where chaotic behavior is liable to emerge, or else configurations where atomic mirrors with adjustable reflectivity can be set up, i.e. tunneling barriers. Combining the tunneling effect, chaos, disorder and controlled interactions, we aim to simulate physical problems that were first encountered in condensed matter physics.

Page 109

The diffusion of light

Atomic vapors create ideal conditions for the study of the properties of the scattering of light.

In hot vapors, we have performed studies on anomalous diffusion such as Levy flights. A particular strength of our expertise is the use of large clouds of cold atoms to study interference effects in presence of multiple scattering, opto-mechanical effects of light on cold atoms or the role of gain when there is presence of multiple scattering. We also study the effects of multiple scattering with waves of matter using a Bose-Einstein condensate. Numerical and analytical approaches, applied to quantum gases and strongly correlated quantum systems, provide a theoretical complement to experiments on cold atoms at INLN.

These studies combine to elucidate phenomena spanning different physical domains, from mesoscopic physics, condensed matter, non-linear optics and astrophysics – with long-standing connections to quantum and atomic physics.

Page 110

Qubits in clouds

Our team marries cold atoms with non-linear integrated optics. We produce and manipulate non-classical states of light by controlling photonic entanglement. We do this by setting up optical “chips” that combine several functions on a single substrate of Lithium Niobate.

We are also conducting experiments on laser cooling of atoms (Rubidium and Caesium) in order to store quantum information in cold-atom gases and to perform quantum simulations in optical lattices. We do this by sending photons from our chips to a cold atomic cloud, in which

the qubits are mapped to the gas of atoms in a collective manner and are stored in the clouds.

The gas can also serve as an emitter of single photons, referred to as heralded photons, such as to form the core of a teleportation experiment. This also opens the way to long distance entanglement of two quantum memories.

Page 113

Quantum mechanics and chaos

What happens when chaos meets quantum mechanics? Do we find order in the chaos? In fact this is just what we find, at least in part. The chaotic dynamic introduces a very large number of paths in which the system can evolve. In parallel, quantum mechanics tells us that there will be interference between these paths. Since the trajectories are chaotic, phase results from the sum over many different routes and the interferences globally cancel one another. This exhibits itself as a halt to classic diffusion.

This is what we observe in a “kicked-rotor” experiment where the atomic cloud is “hit” by a pulsed standing laser wave. After the beginnings of diffusion, the energy of the atoms stops increasing. Furthermore and rather surprisingly, this phenomenon shows itself equivalent to that of the Anderson localization of electrons in a disordered system at zero temperature.

Page 114

Postface

We know how to cool atoms to a billionth of a degree above absolute zero. We can “catch” these atoms in traps and thus study their fascinating properties with an unprecedented precision. A strange world appears, dominated by “quan-

tum” laws that stipulate that a particle is also a wave... If the term “cold atoms” does not mean much to the public, ten years have already passed during which there has been an institute bearing this name in Ile-de-France, which has given rise to a wonderful scientific vitality. The fifty or so teams of IFRAF, all present in this book, are rich with numerous doctoral students and post-docs coming from all over the world. The experiments are rather complex, as demonstrated by the photographs here showing tables covered with optics; their charm is that they nevertheless have a human dimension and that each member of a team is able to master each part of the experiment.

IFRAF has instigated topical research projects with great vigor. It has encouraged solid links between groups, avoiding pointless competition. It has organized the exchange of young researchers with other networks in Germany, in Australia, in India and in China. Within France, its activities are enriched by a partnership with researchers in nano-science with the NanoK network in Île-de-France. We should not forget that several teams outside Île-de-France have collaborated with IFRAF and are featured in this book.

The field of research continually grows. Quantum gases trapped in optical lattices may come to help understanding some complex condensed matter phenomena such as superconductivity. New cooled systems have added to the panoply of objects under study: molecules whose chemistry is under perfect control, giant Rydberg atoms, trapped ions and even polaritons. And there is entanglement between cold atoms or with photons, promising unforeseen tools to the world of quantum optics.

It turns out that the applications of cold atoms are more and more spectacular; those for metrology are the most advanced. The best atomic clocks achieve an unimaginable precision and are being miniaturized. A cold atom clock is close to be ready for embarking on the International Space Station in order to test general relativity with unequaled precision. And compact and reliable matter wave interferometers are approaching the stage of practical use in geophysics and as detectors in space.

It was thirty years ago that research on cold atoms began. After the astounding discovery of the Bose-Einstein condensation in 1998, many expected to see all the excitement quickly dissipate. Instead, quite the opposite has happened: the field is in constant expansion, it still attracts a crowd of the most brilliant students. The IFRAF teams constitute a highly dynamic network whose activities are not ready to slow down.

Michèle Leduc



Les traductions ont été effectuées par Adrian Travis et revues par les auteurs.

Table des matières

<i>Préface de Claude Cohen-Tannoudji</i>	4
Laboratoire Kastler Brossel	
Les paradoxes du froid (<i>Jean Dalibard</i>)	7
La particule de Majorana (<i>Sylvain Nascimbène</i>)	8
Équations d'état (<i>Frédéric Chevy</i>)	10
Espaces mixtes (<i>Christophe Salomon</i>)	13
Puces savantes (<i>Jakob Reichel</i>)	14
États intriqués et gaz quantiques (<i>Alice Sinatra</i>)	16
Photons en cavité (<i>Michel Brune</i>)	19
<i>Pas de frontières (Michèle Leduc / Sylvie Rousset)</i>	20
La limite unitaire (<i>Yvan Castin</i>)	23
Tester l'électrodynamique (<i>François Biraben</i>)	25
Ions piégés (<i>Laurent Hilico</i>)	27
Optomécanique et atomes froids (<i>Antoine Heidmann</i>)	29
Optique quantique et semi-conducteurs (<i>Alberto Bramati</i>)	30
Mémoires quantiques (<i>Élisabeth Giacobino</i>)	33
Fluctuations du vide (<i>Astrid Lambrecht</i>)	34
Brouillard d'atomes (<i>Dominique Delande</i>)	35
Laboratoire Charles Fabry	
Interactions photon-photon (<i>Philippe Grangier</i>)	36
Manipulation d'atomes (<i>Antoine Browaeys</i>)	38
Une brève histoire du Groupe d'optique atomique (<i>Alain Aspect</i>)	41
La brillance du condensat (<i>Christoph Westbrook</i>)	43
Désordre dans les gaz 2D (<i>Thomas Bourdel</i>)	44
Localisation d'Anderson (<i>Vincent Josse</i>)	47
Théorie de la matière quantique (<i>Laurent Sanchez-Palencia</i>)	48
Gaz de bosons unidimensionnels (<i>Isabelle Boucroule</i>)	51

<i>L'effort de tous (Bruno Laburthe-Tolra)</i>	52
Systèmes de référence temps-espace	
Horloges à atomes froids (<i>Jocelyne Guéna</i>)	54
Au plus près de la seconde (<i>Sébastien Bize</i>)	57
Du temps au temps (<i>Philippe Laurent</i>)	59
Interférométrie atomique et capteurs inertiels (<i>Franck Pereira dos Santos</i>)	60
Laboratoire Photonique, numérique et nanosciences de Bordeaux	
Heure et pesanteur (<i>Philippe Bouyer</i>)	62
Muquans de Bordeaux	
Vers le gravimètre quantique absolu (<i>Bruno Desruelle</i>)	64
Laboratoire Thales Research and Technology	
Puces transparentes (<i>Sylvain Schwartz</i>)	66
<i>Savoir-faire (Bruno Laburthe-Tolra)</i>	68
Laboratoire de physique des lasers	
Lien optique et temps-fréquence (<i>Anne Amy-Klein</i>)	70
Sondes moléculaires (<i>Anne Amy-Klein</i>)	72
Une puce pour la soupe (<i>Hélène Perrin</i>)	75
Un superfluide à double sens (<i>Hélène Perrin</i>)	76
Des atomes comme des aimants (<i>Bruno Laburthe-Tolra</i>)	79
Nanométrie (<i>Gabriel Dutier</i>)	80
Laboratoire Aimé Cotton	
Les atomes de Rydberg froids (<i>Patrick Cheinet</i>)	83
Molécules froides (<i>Daniel Compartat</i>)	84
Théorie des molécules froides (<i>Olivier Dulieu</i>)	86
Électrons ultrafroids (<i>Daniel Compartat</i>)	88
Lumière « twistée » (<i>Laurence Pruvost</i>)	91
Lyman alpha (<i>Jacques Robert</i>)	92
<i>Les terrasses de l'IFRAF (Viviane Tia)</i>	94

Laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques	
Ions piégés et qubits (<i>Luca Guidoni</i>)	96
Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques	
Problème à N corps (<i>Gora Shlyapnikov</i>)	98
Centre de physique théorique - École polytechnique	
Petites machines thermiques (<i>Antoine Georges</i>)	101
Laboratoire de physique statistique de l'ENS	
Gaz fermioniques ultrafroids (<i>Roland Combescot</i>)	102
Laboratoire de physique théorique et modélisation de Cergy-Pontoise	
Théorie quantique des champs (<i>Philippe Lecheminant</i>)	103
Laboratoire de physique théorique de la matière condensée	
Des atomes froids à la matière condensée (<i>Ludovic Pricoupenko</i>)	104
Laboratoire Collisions, agrégats, réactivité de Toulouse	
Le transport quantique (<i>David Guéry-Odelin</i>).....	106
Institut non linéaire de Nice Sophia Antipolis	
Diffusion de la lumière (<i>Robin Kaiser</i>).....	109
Laboratoire de physique de la matière condensée de Nice	
Des qubits dans les nuages (<i>Sébastien Tanzilli</i>).....	110
Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules de Lille	
Mécanique quantique et chaos (<i>Pascal Szriftgiser</i>)	113
<i>Postface de Michèle Leduc</i>	114
<i>Translations</i>	116

Les laboratoires et leurs tutelles

Laboratoire Kastler Brossel

École normale supérieure
Université Pierre-et-Marie-Curie
Collège de France
CNRS

Laboratoire Charles Fabry

Institut d'optique Graduate School
CNRS
Partenariat avec l'Université Paris-Sud

Laboratoire Système de référence temps-espace

Observatoire de Paris
CNRS
Université Pierre-et-Marie-Curie
Partenariat avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais

Laboratoire Photonique, numérique et nanosciences de Bordeaux

Institut d'optique Graduate School
Université Bordeaux 1
CNRS

Laboratoire Thales Research and Technology

Université Paris-Sud
CNRS
Thales

Laboratoire de physique des lasers

Université Paris 13
CNRS

Laboratoire Aimé Cotton

CNRS
Associé à l'Université Paris-Sud

Laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques

Université Paris Diderot

CNRS

Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques

Université Paris-Sud

CNRS

Centre de physique théorique - École polytechnique

École polytechnique

Université Paris-Sud

CNRS

Laboratoire de physique statistique de l'ENS

École normale supérieure

Université Pierre-et-Marie-Curie

Université Paris Diderot

CNRS

Laboratoire de physique théorique et modélisation de Cergy-Pontoise

Université de Cergy-Pontoise

CNRS

Laboratoire de physique théorique de la matière condensée

Université Pierre-et-Marie-Curie

CNRS

Laboratoire Collisions, agrégats, réactivité de Toulouse

Université Paul Sabatier

CNRS

Institut non linéaire de Nice Sophia Antipolis

CNRS

Université Nice Sophia Antipolis

Laboratoire de la matière condensée de Nice

Université Nice Sophia Antipolis

CNRS

Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules de Lille

Université Lille 1

CNRS

L'Université de recherche Paris Sciences & Lettres rassemble vingt-et-un établissements unis par la volonté de créer une entité comparable, par ses performances, aux plus grandes universités mondiales. Lauréat des « Initiatives d'excellence » (Idex), PSL est la réponse institutionnelle à une ambition collective : susciter des convergences disciplinaires, dynamiser l'innovation et la créativité, attirer et former les meilleurs talents, faire de la recherche un véritable moteur de croissance.

Membres de PSL : Chimie ParisTech, Conservatoire national supérieur d'art dramatique, Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris, Collège de France, École nationale supérieure des arts décoratifs, École nationale supérieure des beaux-arts, École normale supérieure, ESPCI ParisTech, Fondation Pierre-Gilles de Gennes pour la recherche, IBPC-Fondation Edmond de Rothschild, Institut Curie, Institut Louis Bachelier, La Fémis, Lycée Henri-IV, MINES ParisTech, Observatoire de Paris, Université Paris-Dauphine, Association art et recherche, CNRS, INRIA, INSERM.

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Albert Kastler, prix Nobel de physique 1966. Portrait d'un physicien engagé, par Bernard Cagnac, préface de Claude Cohen-Tannoudji, 2013, 76 pages.

Henri Abraham, Eugène Bloch, Georges Bruhat. Les trois physiciens fondateurs du laboratoire de physique de l'École normale supérieure, par Bernard Cagnac, 2010, 84 pages.

Développons les nanomatériaux ! par Sophie Carenco, préface d'Éric Gaffet, 2012, 68 pages.