



Programme et publications PAMO-COLOQ

Date: Mercredi, 04.07.2018

8:30 - 10:30 O3-C: Session Orale PAMO/COLOQ #1

Auditorium

17:30 - 19:00 PO-01 I: Session posters PAMO/COLOQ #1

Salle B22

Date: Jeudi, 05.07.2018

8:30 - 10:30 O5-C: Session Orale PAMO/COLOQ #2

Auditorium

16:45 - 18:45 PO-02 I: Session posters PAMO/COLOQ #2

Salle B22

Présentations

O3-C: Session Orale PAMO/COLOQ #1

Heure: Mercredi, 04.07.2018: 8:30 - 10:30 · Salle: Auditorium

8:30 - 9:10

Invitée

Biréfringence Magnétique du Vide

R. Battesti, M. Hartman, C. Rizzo

LNCMI, France; remy.battesti@lncmi.cnrs.fr

Nous présenterons l'expérience toulousaine dédiée à l'observation de la biréfringence du vide. Nous présenterons les résultats déjà obtenus puis nous détaillerons les nombreuses améliorations apportées à la seconde version de l'expérience actuellement en place. Nous verrons notamment s'il est raisonnable d'espérer observer un jour cet effet.

9:10 - 9:35

Invitée

Des chats de Schrödinger dans l'espace : le projet de mission spatiale MAQRO

A. Heidmann

Laboratoire Kastler Brossel, France; antoine.heidmann@lkb.upmc.fr

Le projet de mission spatiale MAQRO a pour but de tester la frontière quantique-classique avec des objets massifs, dans une gamme inédite de paramètres. Nous ferons le point sur ce projet combinant l'optomécanique, l'interférométrie à ondes de matière et les technologies spatiales, qui a été présenté à l'appel à projet *New Science Ideas* de l'ESA.

9:35 - 10:00

Invitée

une invariance de la lumière en milieu complexe

R. Savo¹, R. Pierrat², U. Najar¹, R. Carminati², S. Rotter³, S. Gigan¹

¹Laboratoire Kastler-Brossel, CNRS-ENS-SU-CDF; ²Institut Langevin ESPCI-CNRS; ³Technical University Vienna (AT); sylvain.gigan@lkb.ens.fr

Nous démontrons expérimentalement que la longueur moyenne parcourue par la lumière dans un milieu désordonné est indépendant de la microstructure du milieu, et ne dépend que des paramètres géométriques du milieu.

10:00 - 10:25

Invitée

Amplification sensible à la phase engendrée par piégeage cohérent de population

P. Neveu¹, C. Banerjee¹, J. Lugani², F. Bretenaker¹, E. Brion¹, F. Goldfarb¹

¹LAC, CNRS, Université Paris-Sud, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay; ²Clarendon Laboratory, University of Oxford, Parks Road, Oxford OX1 3PU, United Kingdom; fabienne.goldfarb@u-psud.fr

Nous avons démontré l'existence d'un procédé d'amplification sensible à la phase utilisant du mélange à quatre ondes (FWM) activé par piégeage cohérent de population. Ce processus, qui passe par des superpositions d'états atomiques, permet d'obtenir un fort gain sensible à la phase même pour de relativement faibles densités optiques.

PO-01 I: Session posters PAMO/COLOQ #1

Heure: Mercredi, 04.07.2018: 17:30 - 19:00 · Salle: Salle B22

REFLEXION SELECTIVE SUR UN GAZ MOLECULAIRE

J. Lukusa Mudiayi, I. Maurin, B. Darquié, S. Tokunaga, D. Bloch, A. Lalot

Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS et Université Paris13-USPC, 93430 Villetaneuse; junior.lukusamudiayi@univ-paris13.fr

Nous avons réalisé une expérience de réflexion sélective pour la première fois sur un gaz moléculaire de NH_3 et aussi de SF_6 . Les spectres obtenus sont de résolution sub-Doppler limités par la largeur de notre laser. Nos expériences nous permettent d'envisager les premières mesures spectroscopiques de l'interaction Casimir-Polder molécule-surface.

Conversion de vortex optique de grande hélicité dans une vapeur atomique

A. Chopinaud, M. Jacquy, B. Viaris de Lesegno, L. Pruvost

Laboratoire Aimé Cotton, France; marion.jacquy@u-psud.fr

Dans le cadre de l'utilisation du moment orbital angulaire de la lumière (OAM) pour les technologies quantiques, nous présentons la conversion d'un vortex optique rouge de grande hélicité, (transportant une grande valeur d'OAM) en un vortex bleu via la transition à deux photons $5S_{1/2} - 5D_{5/2}$ du ^{85}Rb .

High-precision mid-IR molecular spectroscopy with traceability to primary frequency standards using sub-Hz frequency comb-stabilized QCLs

D. B. A. Tran¹, R. Santagata¹, B. Argence¹, O. Lopez¹, S. K. Tokunaga¹, A. Goncharov^{1,2}, M. Abgrall³, Y. Le Coq³, R. Le Targat³, W.-K. Lee³, D. Xu³, P.-E. Pottie³, A. Amy-Klein¹, B. Darquié¹

¹Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 93430 Villetaneuse, France; ²Institute of Laser Physics of SB RAS, Pr. Lavrentyeva 13/3, Novosibirsk 630090, Russia; ³LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, 75014 Paris, France; benoit.darquie@univ-paris13.fr

We present our work towards measuring absolute frequencies of various polyatomic species - in particular methanol - around 10 μm , at an unprecedented level of accuracy, using a both ultra-stable and widely tuneable near-infrared frequency comb.

Manipulation optique de vortex d'Abrikosov dans les supraconducteurs

A. Rochet^{1,2}, W. Magrini¹, A. Bouzidine², P. Tamarat¹, B. Lounis¹

¹LP2N, France; ²LOMA, France; antonine.rochet@institutoptique.fr

Nous avons mis en place une méthode optique permettant de générer in situ une paire de vortex/anti-vortex d'Abrikosov dans un film supraconducteur. Cette technique, en champ lointain, assure la rapidité du procédé et préserve la qualité de l'échantillon. Une unique impulsion laser sépare un vortex d'un anti-vortex de quelques microns.

Refroidissement sympathique d'ions 9Be^+ par un cristal de Coulomb d'ions 88Sr^+

A. Douillet¹, J.-P. Likforman², S. Guibal², V. Tugayé², N. Sillitoe¹, J. Heinrich¹, T. Louvradoux¹, J.-P. Karr¹, L. Hilico¹, L. Guidoni²

¹Laboratoire Kastler Brossel, France; ²Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques; albane.douillet@lkb.upmc.fr

L'étude du refroidissement sympathique en régime de grand rapport de masses est indispensable au bon déroulement de projets ambitieux tels que le projet GBAR [1] ou encore dans la perspective de réaliser la spectroscopie de précision d'ions multichargés [2] ou d'ions moléculaires simples [3].

Spectroscopie du bruit de spin dans l'hélium métastable

P. Neveu, F. Goldfarb, F. Bretenaker

Laboratoire Aimé Cotton, France; pascal.neveu@u-psud.fr

La spectroscopie du bruit de spin permet de sonder de manière non invasive les mécanismes à l'origine des fluctuations d'un ensemble de spins électroniques par interaction avec leur environnement. Nous employons cette technique dans l'hélium métastable en présence de phénomènes cohérents tels que le piégeage cohérent de population par exemple.

Tester la symétrie de parité par spectroscopie vibrationnelle de molécules chirales froides

M. Pierens¹, L. Lecordier¹, A. Cournol¹, M. Manceau¹, D. B. A. Tran¹, R. Santagata¹, A. Shelkovnikov², O. Lopez¹, C. Daussy¹, C. Chardonnet¹, A. Amy-Klein¹, S. K. Tokunaga¹, B. Darquié¹

¹Laboratoire de Physique des Lasers, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, CNRS, F-93430, Villetaneuse, France; ²P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia; matthieu.pierens@univ-paris13.fr

La violation de la parité n'a encore jamais été mis en évidence sur des systèmes moléculaires et devrait se traduire par des différences de fréquences entre les deux énantiomères d'une molécule chirale, que nous avons l'intention de mesurer par spectroscopie laser. Nous présentons ici nos résultats les plus récents dans cette direction.

CONTROLE OPTIQUE DE SPINS NUCLEAIRES A LONGUE DUREE DE VIE DE COHERENCE DANS LES NANOPARTICULES DOPEES TERRES RARES

D. Serrano¹, J. Karlsson¹, A. Fossati¹, A. Tallaire^{1,2}, A. sFerrier¹, P. Goldner¹

¹IRCP, PSL Univeristé, 11, rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris, France; ²Sorbonne Univeristé, UPMC Université Paris 06, 75005 Paris, France; diana.serrano@chimieparistech.psl.eu

Nous démontrons ici le contrôle optique cohérent des spins nucléaires dans des nanoparticules dopées avec des ions de terres rares. A partir des techniques tout-optiques nous avons mesuré des durées de vie de cohérence (T_2) qui vont jusqu'à 8 ms à 5 K, une valeur comparable à celle des monocristaux massifs.

Couplage atome/lumière en présence de nanostructures

D. Wilkowski

Nanyang Technological University, Singapour; david.wilkowski@ntu.edu.sg

En utilisant une couche métallique nano structurée, nous pouvons contrôler la fréquence de résonance des modes plasmonique de surface. Lorsque que cette fréquence coïncide avec une résonance atomique, le système atome/nanostructure se caractérise par une résonance de type-Fano, et par une modification importante de l'interaction atome/surface.

Spectroscopie à haute résolution de la transition 1S–3S de l'atome d'hydrogène

S. Thomas¹, H. Fleurbaey¹, S. Galtier¹, M. Bonnaud¹, L. Julien¹, F. Biraben¹, F. Nez¹, M. Abgrall², J. Guéna²

¹Laboratoire Kastler Brossel, France; ²LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, France; simon.thomas@lkb.upmc.fr

Nous présenterons les derniers résultats de la métrologie de la fréquence de transition 1S–3S, qui contribuent significativement à l'énigme du rayon du proton, et détaillerons nos récentes avancées pour réduire l'effet Doppler du second ordre.

Mesure de précision de la longueur d'onde "tune-out" de lithium par interférométrie atomique

B. Décamps^{1,2}, A. Gauguet^{1,2,4}, J. Vigué^{1,2,3}, M. Büchner^{1,2,3}

¹Lab. Collisions Agrégats Réactivité, UMR 5589; ²Institut de Recherche sur les Systèmes Atomiques et Moléculaires Complexes; ³CNRS; ⁴Université Toulouse III; matthias.buchner@irsamc.ups-tlse.fr

Nous avons mesuré l'effet Stark dynamique avec notre interféromètre à bras séparés. Un faisceau laser intercepte un bras de l'interféromètre et un déphasage de l'onde atomique apparaît. Nous avons mesuré avec précision la longueur d'onde pour laquelle ce déphasage s'annule ("tune-out"). L'expérience est en très bon accord avec la théorie.

Quand les fluctuations d'atome et de surface se couplent : interaction Casimir-Polder entre atome et surface chaude émissive de polaritons résonnants

J. Carvalho¹, A. Laliotis¹, I. Maurin¹, M. Ducloy¹, D. Bloch¹, D. de Sousa Meneses², P. Echehut²

¹Labo Physique des Lasers, Villetaneuse; ²CEMHTI-CNRS, Orléans; isabelle.maurin@univ-paris13.fr

A partir d'effets résonnants dans le couplage entre atome et surface, nous montrons que l'atome est une sonde microscopique des modes de l'émission thermique en champ proche

Faisceau de rubidium froid canalisé : réalisation et perspectives

A. Chopinaud, M. Jacquey, B. Viaris de Lesegno, L. Pruvost

Laboratoire Aimé Cotton, CNRS, Univ. Paris Sud, ENS Cachan, Univ. Paris Saclay, Orsay, France; bruno.viaris@lac.u-psud.fr

On décrit un jet d'atomes froids canalisé par un tube de lumière, ainsi que quelques applications

Décohérence des ondes de matière par radiation de corps noir

B. Décamps^{1,2}, A. Gauguet^{1,2,4}, J. Vigué^{1,2,3}, M. Büchner^{1,2,3}

¹Lab. Collisions Agrégats Réactivité, UMR 5589; ²Institut de Recherche sur les Systèmes Atomiques et Moléculaires Complexes; ³CNRS; ⁴Université Toulouse III; matthias.buchner@irsamc.ups-tlse.fr

Nous avons observé la décohérence d'ondes de lithium par la présence d'une radiation de lampes à halogène-tungstène. Notre interféromètre atomique a été utilisé pour mesurer la perte de la visibilité des franges atomiques. Les directions de quantité de mouvement des photons absorbés et émis par l'atome sont aléatoires et induisent la décohérence.

Observation of coherent population trapping involving three (optical) photons

M. Collombon, C. Chatou, M. Marchenay, D. Guyomarc'h, G. Hagel, M. Houssin, J. Pedregosa, M. Knoop, C. Champenois

CNRS-AMU, France; marylise.marchenay@univ-amu.fr

Three-photon coherent population trapping is observed in a cloud of laser-cooled calcium ions in an RF-linear quadrupole trap. The dark state involves the two metastable D-states which can serve as optical or THz qubits. We use an optical frequency comb to simultaneously lock the 3 involved lasers and constrain their relative phase fluctuations.

Holographie quantique avec des paires de photons intriqués de grande dimensionalité spatiale

F. Devaux¹, A. Alexis Mosset², F. Bassignot³, E. Lantz¹

¹Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon; ²Institut FEMTO-ST, Besançon; ³FEMTO Engineering, Besançon; fabrice.devaux@univ-fcomte.fr

Nous présentons les résultats expérimentaux de la restitution d'un hologramme de phase par la mesure de corrélations quantiques spatiales entre des paires de photons intriqués de très grande dimensionnalité spatiale.

Transduction optomécanique de photons microonde en photons optiques

E. Ivanov, T. Capelle, E. Flurin, S. Deléglise, T. Jacqmin, T. Briant, A. Heidmann

Sorbonne Université, France; edouard.ivanov@lkb.upmc.fr

Le présent travail a pour objectif d'atteindre une conversion de photons entre des fréquences microondes et des fréquences optiques. Cela permet de combiner les propriétés des circuits supraconducteurs dans l'information quantique, à la facilité de transport des photons optiques. Pour cela, des nanomembranes en nitrure de silicium sont utilisées.

INTERACTION D'UN ATOME DE RYDBERG AVEC UNE NANOFIBRE OPTIQUE

E. Stourm

Université Paris-Sud, France; erwan.stourm@u-psud.fr

Nous étudions théoriquement l'émission spontanée d'un atome de RYDBERG à proximité d'une nanofibre optique de silice. Les résultats numériques obtenus montrent que les photons émis sont susceptibles d'être guidés le long de la fibre et suggèrent qu'une telle nanofibre optique peut être utilisée pour mettre en réseau des registres quantiques atomiques.

Focalisation cohérente et sélection spectrale d'harmoniques d'ordre élevé sans optique XUV

C. Valentin¹, K. Veyrinas¹, L. Quintard¹, V. Strelkov², J. Vabek¹, O. Hort¹, A. Dubrouil¹, D. Descamps¹, F. Burgy¹, C. Péjot¹, F. Catoire¹, E. Contant³, E. Mével¹

¹CELIA, Université de Bordeaux-CNRS--CEA, France; ²A M Prokhorov General Physics Institute of , FranceRussian Academy of Sciences, Russie; ³ILM, Université Lyon 1-CNRS, France; constance.valentin@U-BORDEAUX.FR

Les harmoniques d'ordre élevé produisent une source XUV cohérente attoseconde. Le contrôle des paramètres macroscopiques de génération permet d'ajuster le profil spatial et la divergence des faisceaux XUV qui dépendent de l'ordre. Le filtrage spatial est un moyen élégant de sélectionner quelques harmoniques sans filtre métallique, ni optique XUV.

O5-C: Session Orale PAMO/COLOQ #2

Heure: Jeudi, 05.07.2018: 8:30 - 10:30 · Salle: Auditorium

8:30 - 9:10

Invitée

LE RAYON DE DISTRIBUTION DE CHARGE DU PROTON PAR SPECTROSCOPIE DE SYSTEMES ATOMIQUES SIMPLES

H. Fleurbaey¹, S. Galtier¹, S. Thomas¹, M. Bonneaud¹, L. Julien¹, F. Biraben¹, F. Nez¹, M. Abgrall², J. Guena²

¹Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France; ²LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, ENS-Université PSL, CNRS, Sorbonne Université; francois.nez@lkb.upmc.fr

La spectroscopie à haute résolution de systèmes atomiques simples permet d'accéder à des grandeurs fondamentales de la physique. Or les mesures de l'une d'elles sur plusieurs systèmes donnent des résultats différents. Nous ferons le point sur ces désaccords à partir de notre récente spectroscopie 1S-3S de l'atome d'hydrogène.

9:10 - 9:35

Invitée

Dynamique superfluide d'un gaz de Bose

M. de Goër de Herve, A. Kumar, C. De Rossi, Y. Guo, R. Dubessy, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon, H. Perrin

LPL CNRS UP13, France; helene.perrin@univ-paris13.fr

Nous avons mis en évidence la nature superfluide d'un gaz de Bose bidimensionnel (2D) confiné dans un piège harmonique grâce à une technique d'analyse locale de la dynamique. La superfluidité conduit aussi au phénomène d'écoulement permanent lorsque le gaz est confiné dans un piège annulaire.

9:35 - 10:00

Invitée

Molecular Alignment Inside Helium Nanodroplets

P. Vindel Zandbergen¹, J. Jiang², M. Barranco³, M. Lewerenz², C. Meier¹, M. Pi², N. Halberstadt¹

¹Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 09, France; ²Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi Echelle, Equipe de Chimie Théorique, 5 Boulevard Descartes 77454 Marne-la Vallée Cedex 2, France; ³Departament FQA, Facultat de Física, and IN2UB, Universitat de Barcelona, Diagonal 645, 08028 Barcelona, Spain; patricia.vindel@irsamc.ups-tlse.fr

We present a quantum dynamical analysis of the impulsive alignment and subsequent rotational motion of the CH₃I-He complex. The emphasis is laid on the effect of the helium atom onto the coherent time evolution of the rotor states. The results are discussed with respect to experiments of non adiabatic alignment in superfluid He droplets.

10:00 - 10:25 Attention : les présentations finissent avant la fin de la session !

Invitée

Rayons X - outil de choix pour l'exploration de processus fondamentaux

C. Miron

CEA Paris-Saclay, France; catalin.miron@cea.fr

De nouveaux phénomènes ont été observés et de nouvelles voies de recherche ouvertes récemment grâce à la disponibilité de lignes de lumière de rayons X à hautes performances : flux et résolution spectrale aux synchrotrons de 3^{ème} génération, intensité et brièveté des impulsions aux lasers à électrons libres (LEL). Quelques exemples seront discutés.

AMPLIFICATION SENSIBLE À LA PHASE ENGENDRÉE PAR PIÉGEAGE COHÉRENT DE POPULATION

P. Neveu¹, C. Banerjee¹, J. Lugani^{1,2}, F. Bretenaker¹, E. Brion¹ et F. Goldfarb¹

¹ LAC-CNRS, Université Paris-Sud, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France

² Clarendon Laboratory, University of Oxford, Parks Road, Oxford OX1 3PU, United Kingdom

fabienne.goldfarb@u-psud.fr

RÉSUMÉ

Nous avons démontré l'existence d'un procédé d'amplification sensible à la phase utilisant du mélange à quatre ondes activé par piégeage cohérent de population (CPT). Ce processus utilise deux transitions partant du même état fondamental dégénéré. L'une des transitions est utilisée pour réaliser le CPT, définissant les états sombre et brillant à partir desquels un mélange à quatre ondes très efficace est alors obtenu via l'autre transition : il permet d'obtenir un fort gain sensible à la phase même pour de faibles densités optiques et une excitation hors résonance de la deuxième transition.

MOTS-CLEFS : *coherent population trapping, four wave mixing, phase sensitive amplification*

1. INTRODUCTION

Les processus d'amplification paramétrique optique sont étudiés pour leurs propriétés de bruit singulières et leurs nombreuses applications possibles en métrologie, imagerie et télécommunications. Ils ont été mis en œuvre dans différents milieux, tels que les cristaux non linéaires et les guides d'ondes pour le mélange à trois ondes, ou les fibres pour le mélange à quatre ondes (FWM). Dans de tels processus, un ou deux champ(s) de couplage intense(s) Ω_c jouent le rôle d'un réservoir de photons pour un signal Ω_s et un complémentaire Ω_i , où $\Omega_{c,s,i}$ sont les fréquences de Rabi respectives de ces champs. En fonction de la phase relative entre ces champs, les photons peuvent être transférés de la (des) pompe(s) aux champs signal et complémentaire ou inversement. Un tel processus d'amplification sensible à la phase (PSA) permet la génération d'états de lumière comprimés, qui sont intéressants pour l'optique quantique, les mémoires atomiques, ou les protocoles de traitement d'information quantique. Une réduction du bruit quantique jusqu'à 10 dB a été obtenue en utilisant des cristaux, mais les photons obtenus sont en dehors des résonances des systèmes atomiques utilisés pour le stockage. La PSA obtenue directement par FWM dans les systèmes atomiques n'a pas cet inconvénient, et suscite donc toujours l'intérêt [1].

2. AMPLIFICATION SENSIBLE À LA PHASE VIA DES ÉTATS DE SUPERPOSITION ATOMIQUE

Dans les systèmes atomiques, l'efficacité d'un mélange à quatre ondes peut être améliorée grâce à du piégeage cohérent de population [2]. Les résultats obtenus par Lugani & al [3] dans une cellule d'hélium métastable, peuvent ainsi être expliqués par l'existence de CPT, mais dans un schéma original d'amplification sensible à la phase utilisant des superpositions d'états atomiques. Ce processus est possible grâce à l'utilisation de deux transitions D_1 et D_2 partant du même état fondamental dégénéré. La transition D_1 est excitée à résonance par un faisceau de couplage à la fréquence ω_0 , polarisé linéairement et donc somme à poids égaux de polarisations circulaires droite et gauche. Les deux états fondamentaux $|\pm 1\rangle$ sont ainsi couplés au même niveau excité $|0\rangle$ (Fig. 1.a), et les atomes sont pompés dans l'état noir $|-\rangle_g = \left[|+1\rangle_g - |-1\rangle_g\right] / \sqrt{2}$. On peut alors définir un état brillant orthogonal $|+\rangle_g = \left[|+1\rangle_g + |-1\rangle_g\right] / \sqrt{2}$, couplé au niveau excité par le faisceau de couplage, mais état noir pour les faisceaux sonde et complémentaire, qui sont polarisés perpendiculairement au couplage (Fig. 1.b). Un mélange à quatre ondes extrêmement efficace peut alors être obtenu via la transition D_2 , et les champ

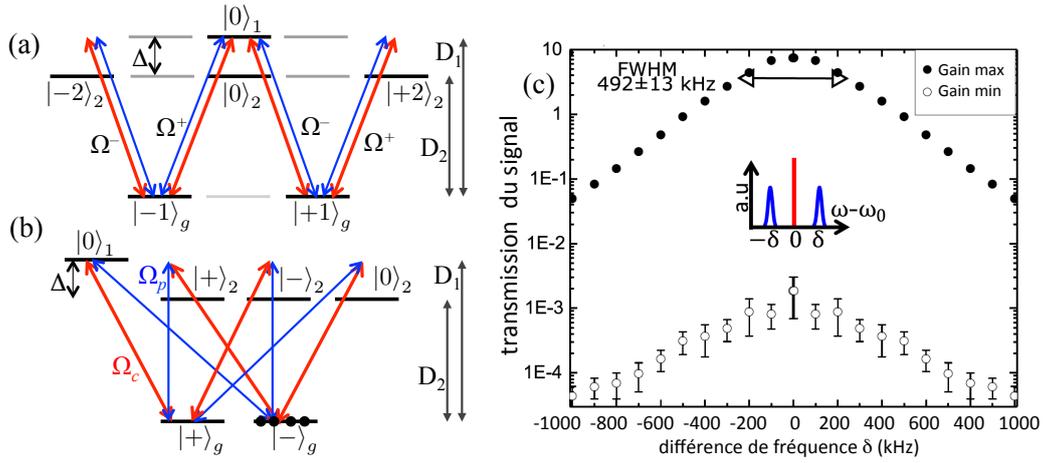


FIGURE 1 : (a) : Transitions D_1 and D_2 de l'hélium métastable, excitées par un laser de couplage (rouge) et des lasers signal/complémentaire (bleus) polarisés linéairement et orthogonalement. Du fait des règles de sélection et du pompage optique, les niveaux en gris peuvent être négligés. Ω^\pm sont les fréquences de Rabi totales dans la base circulaire σ_\pm . (b) Schéma des transitions atomiques dans la base de superposition d'états : comme ils sont polarisés orthogonalement, les lasers de couplage (Ω_c) et de signal/complémentaire ($\Omega_{s,i}$) excitent des transitions différentes (c) Mesure de la transmission des champs signal et complémentaire en fonction de leur désaccord δ avec le couplage. En scannant la phase relative des trois champs, on peut extraire les gains maximum (●) et minimum (○). La bande passante du processus est celle du CPT induit par le laser de couplage

signal et complémentaire, désaccordés d'une quantité $\pm\delta$ par rapport au couplage, sont amplifiés via les chemins suivants :

$$\begin{aligned} \text{via } |\pm 2\rangle_2 : & \quad |-\rangle_g \xrightarrow{\Omega_c} |+\rangle_2 \xrightarrow{\Omega_{s,i}^*} |+\rangle_g \xrightarrow{\Omega_c} |0\rangle_1 \xrightarrow{\Omega_{i,s}^*} |-\rangle_g, \\ \text{via } |0\rangle_2 : & \quad |-\rangle_g \xrightarrow{\Omega_c} |0\rangle_2 \xrightarrow{\Omega_{s,i}^*} |+\rangle_g \xrightarrow{\Omega_c} |0\rangle_1 \xrightarrow{\Omega_{i,s}^*} |-\rangle_g. \end{aligned}$$

où $|\pm 2\rangle_2 = [| + 2 \rangle_2 \pm | - 2 \rangle_2] / \sqrt{2}$. Grâce à la transparence induite par CPT, on obtient une forte amplification sensible à la phase (Fig. 1.c) pour les champs signal et complémentaire, même à de relativement faibles épaisseurs optique et assez loin de la résonance de la transition D_2 : avec une épaisseur optique de l'ordre de 2,7 dans la cellule d'hélium métastable et des transitions séparées de 2,29 GHz (pour un élargissement Doppler de l'ordre de 0,9 GHz), il a ainsi été possible d'atteindre des gains de l'ordre de 9,3 dB. Cette augmentation de l'efficacité du FWM peut être interprétée dans le formalisme du polariton noir, et un traitement analytique permet d'extraire les propriétés du processus d'amplification et de montrer qu'il a les propriétés d'un squeezer parfait [4].

3. CONCLUSION

Un tel processus de PSA engendré par CPT devrait être associé à la génération d'états fortement comprimés, qui seront étudiés ultérieurement. Par ailleurs, les propriétés de propagation du polariton d'état noir font qu'il est envisageable de stocker et générer sur demande des états comprimés à deux modes.

RÉFÉRENCES

- [1] N. V. Corzo, A. M. Marino, K. M. Jones, and P. D. Lett, Phys. Rev. Lett. **109**, 043602 (2012).
- [2] S. E. Harris, J. E. Field, and A. Imamoglu Phys. Rev. Lett. **64**, 1107 (1990)
- [3] J. Lugani, C. Banerjee, M.-A. Maynard, P. Neveu, W. Xie, R. Ghosh, F. Bretenaker, and F. Goldfarb, Opt. Lett. **41**, 4731-4734 (2016).
- [4] P. Neveu, C. Banerjee, J. Lugani, F. Bretenaker, E. Brion and F. Goldfarb, arXiv :1803.05435 (2018).

BIRÉFRINGENCE MAGNÉTIQUE DU VIDE

Rémy Battesti¹, Michael T. Hartman¹, Carlo Rizzo¹

¹ *Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses UPR3228 CNRS-UPS-UGA-INSA, 31400 Toulouse, France*

remy.battesti@lncmi.cnrs.fr

RÉSUMÉ

Les travaux théoriques d'Heisenberg et Euler au début du XXème siècle ont montré que le vide se comportait comme un milieu optique non-linéaire. Il ressort de ces travaux que de nombreux effets issus de l'interaction photon-photon sont attendus dans le vide parmi lesquels l'effet Cotton-Mouton également appelé Biréfringence Magnétique du Vide. Cet effet n'a encore jamais été observé expérimentalement malgré les nombreux efforts faits depuis plus d'un demi-siècle. Nous présenterons l'aventure de l'expérience toulousaine dédiée à cette observation basée au Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses dont le challenge est de mesurer une ellipticité de polarisation aussi faible que 10^{-9} radian induite par des champs magnétiques pulsés de l'ordre d'une vingtaine de Tesla.

MOTS-CLEFS : *Biréfringence magnétique du vide ; cavité Fabry-Perot ; champs magnétiques pulsés ; électrodynamique quantique*

1. INTRODUCTION

La théorie classique de l'électrodynamique, modifiée et développée depuis les années 30 pour prendre en compte les principes quantiques, a fait naître l'électrodynamique quantique. Cette théorie a été testée expérimentalement à maintes reprises et avec une précision exceptionnelle. Néanmoins, il reste des phénomènes prédits par cette théorie mais encore jamais observés : ceux issus de l'interaction entre les fluctuations du vide et le photon seul. Ce type d'interaction photon-photon a été décrit par Heisenberg et Euler [1] dans les années 30. Sous l'effet de champs électriques ou magnétiques, le vide se polarise et de nombreux effets non-linéaires sont alors possibles [2]. Parmi les phénomènes attendus mais jamais observés, on trouve l'effet de biréfringence induite dans le vide par un champ magnétique intense (Biréfringence Magnétique du Vide : BMV) aussi appelé effet Cotton-Mouton du vide, en relation avec les travaux effectués au début du XXème siècle par les physiciens Cotton et Mouton dans les gaz. Dans le vide donc l'indice de réfraction n_{\parallel} pour une lumière polarisée parallèlement au champ magnétique \mathbf{B} est différent de l'indice n_{\perp} vu par la lumière polarisée perpendiculairement à \mathbf{B} donnant lieu à une biréfringence Δn_{CM} :

$$\Delta n_{\text{CM}} = n_{\parallel} - n_{\perp}, \quad (1)$$

$$= k_{\text{CM}} B^2. \quad (2)$$

où, au premier ordre avec la constante de structure fine α , k_{CM} s'écrit :

$$k_{\text{CM}} = 2\alpha^2 \hbar^3 / 15\mu_0 m_e^4 c^5, \quad (3)$$

avec \hbar la constante de Planck réduite, m_e la masse de l'électron, c la vitesse de la lumière dans le vide, et μ_0 la perméabilité magnétique du vide. En utilisant les valeurs recommandées par le CODATA pour les constantes fondamentales [3], nous obtenons :

$$k_{\text{CM}} \sim 4.0 \times 10^{-24} \text{T}^{-2}. \quad (4)$$

A ce jour, aucune expérience n'est encore parvenue à observer cet effet. Les différentes tentatives sont basées sur la proposition de Iacopini et Zavattini [4] de mesurer la biréfringence Δn_{CM} via l'ellipticité ψ induite par le champ magnétique sur une lumière polarisée se propageant au sein du vide biréfringent :

$$\psi = \pi k_{\text{CM}} \frac{L_B}{\lambda} B^2 \sin 2\theta_P, \quad (5)$$

avec λ est la longueur d'onde du laser, L_B la longueur sur laquelle est appliqué le champ magnétique, et $\theta_P = 45^\circ$ l'angle entre la lumière polarisée et le champ magnétique. Pour rendre cet effet mesurable, l'idée est ensuite d'utiliser une cavité Fabry-Perot de très grande finesse F afin de faire faire de nombreux allers-retours à la lumière au sein du champ magnétique et ainsi d'amplifier l'ellipticité d'un facteur $2F/\pi$.

$$\Psi = \frac{2F}{\lambda} k_{\text{CM}} L_B B^2 \sin 2\theta_P. \quad (6)$$

Dans cette contribution, nous présenterons l'expérience basée au Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses de Toulouse capable de générer de très fort champs magnétiques pulsés. Après avoir rappelé brièvement les résultats obtenus avec la première version de cette expérience [5] nous décrirons les nombreuses améliorations apportées pour espérer observer cet effet. Nous décrirons notamment les nouveaux aimants *XXL-coils* capables de délivrer 20 T avec un facteur B^2L de l'ordre de 100 $T^2\text{m}$ (au lieu de 6 $T^2\text{m}$ auparavant) ainsi que l'amélioration de la sensibilité optique de plusieurs ordres de grandeur. Ceci a été rendu possible notamment par le développement d'un modèle de bruit complet que nous présenterons [6] et nous verrons s'il est raisonnable d'envisager ou non l'observation de cet effet.

RÉFÉRENCES

- [1] W. Heisenberg and H. Euler, "Folgerungen aus der diracschen theorie des positrons," *Zeitschrift für Physik*, vol. 98, no. 11, pp. 714–732, 1936. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1007/BF01343663>
- [2] R. Battesti and C. Rizzo, "Magnetic and electric properties of a quantum vacuum," *Reports on Progress in Physics*, vol. 76, no. 1, p. 016401, 2013. [Online]. Available : <http://stacks.iop.org/0034-4885/76/i=1/a=016401>
- [3] D. B. N. Peter. J. Mohr and B. N. Taylor, "Codata recommended values of the fundamental physical constants : 2014," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 88, p. 1527, 2016.
- [4] E. Iacopini and E. Zavattini, "Experimental method to detect the vacuum birefringence induced by a magnetic field," *Physics Letters B*, vol. 85, no. 1, pp. 151 – 154, 1979. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269379907974>
- [5] A. Cadène, P. Berceau, M. Fouché, R. Battesti, and C. Rizzo, "Vacuum magnetic linear birefringence using pulsed fields : status of the bmv experiment," *The European Physical Journal D*, vol. 68, no. 1, p. 16, 2014. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1140/epjd/e2013-40725-9>
- [6] M. T. Hartman, A. Rivère, R. Battesti, and C. Rizzo, "Noise characterization for resonantly enhanced polarimetric vacuum magnetic-birefringence experiments," *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, no. 12, p. 123114, 2017. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1063/1.4986871>

DES CHATS DE SCHRÖDINGER DANS L'ESPACE : LE PROJET DE MISSION SPATIALE MAQRO

Antoine Heidmann¹ et le consortium MAQRO

¹ *Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-PSL Université, Collège de France
Campus Pierre et Marie Curie, 75005 Paris, France*

antoine.heidmann@lkb.upmc.fr

RÉSUMÉ

Le projet de mission spatiale MAQRO a pour objectif de tester l'une des questions fondamentales de la mécanique quantique - la frontière quantique-classique avec des objets macroscopiques massifs - dans une gamme inédite de paramètres, largement inexplorée sur terre. Nous ferons le point sur ce projet combinant les techniques les plus modernes en optomécanique, interférométrie à ondes de matière et technologies spatiales, qui a été présenté à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en tant que mission de taille intermédiaire, puis à l'appel à projet *New Science Ideas* de l'ESA.

MOTS-CLEFS : *physique quantique; optomécanique quantique; ondes de matière*

La célèbre expérience de pensée de Schrödinger avec un chat à la fois mort et vivant aborde une question cruciale de la physique quantique : ses lois restent-elles applicables sans modification jusqu'au niveau macroscopique ? Les expériences sur les ondes de matière ont confirmé la physique quantique, depuis l'échelle des électrons, des atomes et des petites molécules jusqu'à des molécules massives avec quelques centaines d'atomes. Pourtant, de telles expériences sont loin d'un régime de masse où des théories alternatives prédisent des déviations par rapport à la physique quantique.

L'utilisation de systèmes de plus en plus massifs sur Terre doit faire face à des contraintes liées principalement à la qualité limitée de l'isolation vis-à-vis de l'environnement et au temps réduit pour une chute libre. Les tests les plus prometteurs envisagés à l'heure actuelle sont basés sur le contrôle optomécanique de microsphères à lévitation magnétique. Le projet spatial MAQRO franchit une étape supplémentaire face à ces défis : il s'agit d'exploiter l'environnement spatial en microgravité pour réaliser des expériences d'interférométrie à ondes de matière avec des masses élevées, les techniques modernes développées pour l'optomécanique permettant à la fois de préparer l'état quantique de la masse test et de réaliser des mesures de grande sensibilité.

Le composant central de MAQRO est un banc optique monté à l'extérieur du satellite et isolé thermiquement par plusieurs boucliers (voir figure 1 à gauche). Cette conception permettra à MAQRO d'exploiter de façon optimale le froid et le vide de l'espace profond, créant un environnement unique répondant aux exigences thermiques et de vide nécessaires pour des expériences quantiques avec des sphères macroscopiques en microgravité. Le banc optique permettra de contrôler et de mesurer précisément l'état d'une nanosphère en la piégeant et la refroidissant optiquement à l'aide d'une cavité optique de grande finesse. L'objectif est de préparer un chat de Schrödinger où la nanosphère est localisée à la fois en deux positions distinctes, puis de la laisser évoluer en chute libre pendant des temps longs, enfin de mesurer sa position et d'analyser sa décohérence éventuelle (voir figure 1 à droite).

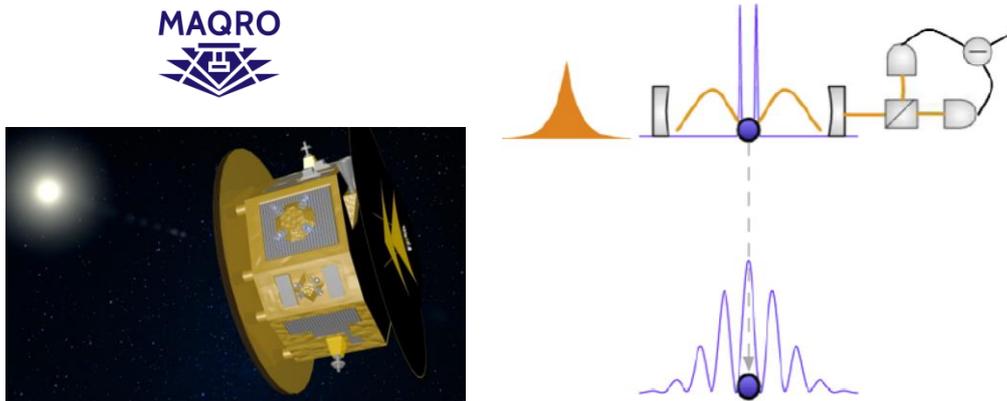


Fig. 1 : Vue d'artiste du satellite (à gauche) et principe de la préparation, de l'évolution en chute libre, puis de la mesure de l'état quantique d'une nanosphère.

L'objectif de la mission spatiale MAQRO est ainsi de créer une plateforme pour des expériences quantiques avec des objets macroscopiques dans l'espace, en combinant les techniques de l'optomécanique quantique, l'interférométrie à ondes de matière avec des nanosphères piégées optiquement, et les technologies spatiales les plus modernes (en particulier le contrôle de la microgravité réalisé avec LISA-Pathfinder). Ceci devrait permettre de sonder la transition "quantique-classique" dans un régime inédit et inexploré, et fournir un test de la théorie quantique dans un régime de masse difficile à atteindre dans des expériences au sol.

Le projet MAQRO implique une cinquantaine de scientifiques principalement de différents pays européens (Autriche, Allemagne, Italie, France, Suède, Suisse), des Etats-Unis et de l'Australie.

REFERENCE

- [1] R. Kaltenbaek and the MAQRO consortium, "Macroscopic Quantum Resonators (MAQRO): 2015 update", EPJ Quantum Technology (2016) 3:5. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-016-0043-7>

DYNAMIQUE SUPERFLUIDE D'UN GAZ DE BOSE

**Mathieu de Goër de Herve, Avinash Kumar, Camilla De Rossi, Yanliang Guo, Romain Dubessy,
Thomas Badr, Aurélien Perrin, Laurent Longchambon et Hélène Perrin**

*Laboratoire de Physique des Lasers, UMR CNRS 7538, Université Paris 13 Sorbonne Paris Cité, 93430
Villetaneuse, France*

helene.perrin @ univ-paris13.fr

RÉSUMÉ

Nous avons mis en évidence la nature superfluide d'un gaz de Bose bidimensionnel (2D) confiné dans un piège harmonique grâce à une technique d'analyse locale de la dynamique. La superfluidité conduit aussi au phénomène d'écoulement permanent lorsque le gaz est confiné dans un piège annulaire.

MOTS-CLEFS : *Gaz quantique; dynamique; dimension deux; superfluidité; courant permanent*

1. INTRODUCTION

Les gaz ultra froids, en-dessous de la température critique de dégénérescence quantique, présentent des propriétés de superfluidité lorsque les interactions entre atomes sont faibles et répulsives. C'est le cas par exemple des condensats de Bose-Einstein de rubidium, ce qui est la situation habituelle en dimension trois. En dimension deux, la condensation de Bose-Einstein n'est présente que pour un système de taille finie (piégé notamment). Cependant le gaz est tout de même superfluide en dessous d'une température critique, par le mécanisme d'appariement de vortex de Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) [1].

Mettre en évidence la superfluidité dans un gaz quantique nécessite de recourir à des expériences de dynamique. En effet, la superfluidité se caractérise par différents critères dynamiques :

- (i) l'existence d'une *vitesse critique* pour les excitations, en-deçà de laquelle le superfluide reste au repos (critère de Landau) ; corrélé à cela, la résistance à la rotation, avec un moment d'inertie qui s'annule ; de façon symétrique, la persistance du flux lorsque le superfluide est placé en rotation dans un « récipient » annulaire (qui peut être un piège immatériel)
- (ii) le caractère *irrotationnel* de l'écoulement et la quantification de la circulation \mathcal{C} de sa vitesse (son intégrale sur un contour fermé) en unités de h/M , où M est la masse de l'atome, qui conduit à la présence de vortex de circulation quantifiée lorsque l'on fait tourner le gaz suffisamment vite.

De façon générale, le gaz obéit à une hydrodynamique superfluide, qui inclut l'existence de modes spécifiques : des ondes sonores pour un gaz uniforme, des modes collectifs (mode quadrupolaire, mode ciseaux) pour un gaz piégé.

Au LPL nous avons mis en évidence deux signatures de la dynamique superfluide d'un gaz de Bose : l'existence d'un mode ciseaux, dont une mesure locale de la fréquence permet de situer la frontière entre phase normale et phase superfluide d'un gaz 2D inhomogène [2] ; et la présence d'un écoulement permanent dans un gaz superfluide placé en géométrie annulaire.

2. MODE CISEAUX À TRAVERS LA TRANSITION BKT

Dans un piège harmonique anisotrope de pulsations ω_x et ω_y , le mode ciseaux correspond à l'oscillation de la moyenne $\langle xy \rangle$, ce qui se traduit par une oscillation de l'axe long. Ce mode est caractéristique de la phase superfluide, où sa fréquence vaut $\omega_c = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$. Il peut être excité par une rotation soudaine des axes du piège. Dans la phase normale, une telle excitation conduit à des oscillations le long des deux axes, et la moyenne $\langle xy \rangle$ présente un battement aux fréquences $\omega_{\pm} = \omega_x \pm \omega_y$.

Pour mettre en évidence l'étendue de la phase superfluide dans un gaz 2D inhomogène, nous avons analysé l'évolution après excitation en calculant la moyenne $\langle xy \rangle$ non pas sur tout le nuage, mais sur une fine zone d'isodensité de rayon r_a définie par $\frac{\omega_x}{\omega_y}x^2 + \frac{\omega_y}{\omega_x}y^2 = r_a^2$, voir Fig. 1(a). On observe alors clairement sur la figure 1(b) un saut brusque de cette fréquence de ω_c dans le cœur superfluide au centre (r_a petit) à ω_+ à la périphérie. La zone où la fréquence change correspond à la frontière entre la phase superfluide et la phase normale, avec un bon accord avec la théorie BKT.

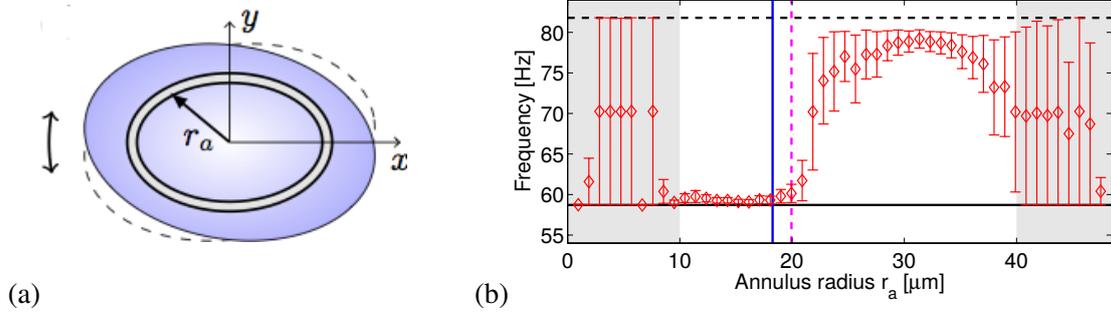


FIGURE 1 : (a) Zone de calcul local du moment $\langle xy \rangle$ au rayon r_a . (b) Valeur de la fréquence d'oscillation de $\langle xy \rangle$ la plus grande en fonction du rayon caractéristique r_a . Ligne bleue continue : prédiction de la théorie BKT.

3. CIRCULATION D'UN GAZ QUANTIQUE ANNULAIRE

Dans une autre expérience, nous avons placé le gaz dans un piège annulaire résultant d'une combinaison entre potentiel adiabatique radiofréquence [3] et piège dipolaire [4] et excité sa rotation en imposant une faible anisotropie à l'anneau, que l'on fait tourner. La circulation peut également être préparée par impression de phase [5]. Selon la valeur de la vitesse de rotation, il en résulte un écoulement permanent, dont la circulation est quantifiée. L'existence d'un écoulement se traduit après un temps de vol par la présence d'un trou central dans la distribution de densité, de taille déterminée par la circulation.

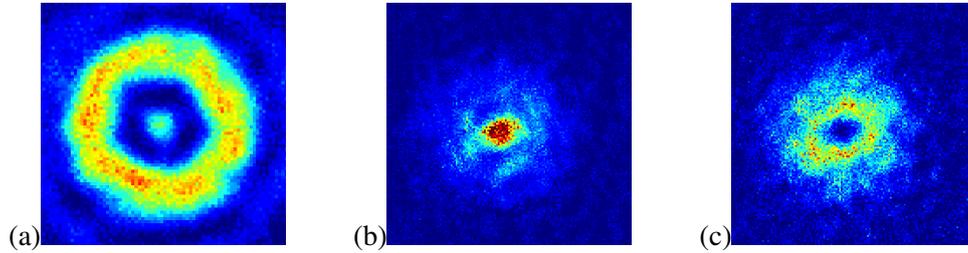


FIGURE 2 : (a) Image *in situ* des du gaz superfluide confiné dans un piège annulaire de rayon $20 \mu\text{m}$ (le point central est de la diffraction due à la résolution de l'optique d'imagerie). (b-c) Distribution de densité après temps de vol. (b) Le superfluide est au repos, la densité est maximale au centre. (c) Le superfluide possède une circulation non nulle, ce qui se traduit par un trou au centre.

- [1] J. Dalibard, "Fluides quantiques de basse dimension et transition de Kosterlitz–Thouless," 2017, cours au Collège de France.
- [2] C. De Rossi *et al.*, "Probing superfluidity in a quasi two-dimensional Bose gas through its local dynamics," *New Journal of Physics*, vol. 18, no. 6, p. 062001, 2016.
- [3] H. Perrin and B. M. Garraway, "Trapping atoms with radio-frequency adiabatic potentials," in *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, P. Berman *et al.*, Eds. Academic Press, 2017, vol. 66, ch. 4, pp. 181–262.
- [4] O. Morizot *et al.*, "Ring trap for ultracold atoms," *Phys. Rev. A*, vol. 74, p. 023617, 2006.
- [5] A. Kumar *et al.*, "Producing superfluid circulation states using phase imprinting," *ArXiv e-prints*, January 2018, preprint arXiv :1801.04792.

LE RAYON DE DISTRIBUTION DE CHARGE DU PROTON PAR SPECTROSCOPIE DE SYSTEMES ATOMIQUES SIMPLES

Hélène Fleurbaey^{1*}, Sandrine Galtier^{1#}, Simon Thomas¹, Marie Bonnaud¹, Lucile Julien¹, François Biraben¹, François Nez¹, Michel Abgrall², Jocelyne Guéna².

¹ Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France, 4 place Jussieu, Case 74, 75252 Paris Cedex 05, France

² LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, ENS-Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

francois.nez@lkb.upmc.fr

RÉSUMÉ

La spectroscopie à haute résolution de systèmes atomiques simples permet d'accéder à des grandeurs fondamentales de la physique. Or les mesures de l'une d'elles sur plusieurs systèmes donnent des résultats différents. Nous ferons le point sur ces désaccords à partir de notre récente spectroscopie 1S-3S de l'atome d'hydrogène.

MOTS-CLEFS : rayon du proton; hydrogène; constantes fondamentales; métrologie

1. LA PROBLEMATIQUE DU RAYON DU PROTON

L'atome d'hydrogène (H) est le plus simple des atomes il peut donc être modélisé très précisément. L'expression théorique de ses niveaux d'énergie E peut se mettre sous la forme :

$$E \approx -\frac{m_{red}}{m_e} hcR_\infty \left\{ \frac{1}{n^2} + \frac{1}{n^3} \left(\frac{m_{red}}{m_e} \right)^3 F(\alpha, \log \alpha) + \frac{1}{n^3} \left(\frac{m_{red}}{m_e} \right)^3 G\left(\frac{r_p^2}{a_0^2}\right) \right\}$$

où m_{red} est la masse réduite du système atomique, m_e la masse de l'électron, n le nombre quantique principal, R_∞ la constante de Rydberg, α la constante de structure fine, a_0 le rayon de Bohr et r_p le rayon de distribution de charge du noyau, appelé communément « rayon du proton ». La fonction F décrit les corrections d'électrodynamique quantique (QED) ($F/n^3 \ll 1/n^2$) et la fonction G la contribution de la distribution de charge finie du noyau ($G < F$). La comparaison théorie-expérience de son spectre lumineux a été et reste une source importante de développements tant théoriques qu'expérimentaux.

En 2010, la spectroscopie du déplacement de Lamb 2S-2P de l'hydrogène muonique (μ -p), formé d'un proton (p) et d'un muon (μ), a été faite à l'institut Paul Scherrer en Suisse pour déterminer r_p . Comme le muon est 207 fois plus massif que l'électron, il est plus proche du proton et donc la contribution de r_p à l'écart 2S-2P ($\approx F+G$) beaucoup plus importante que pour H. Ainsi r_p peut être déterminé très précisément sans connaître très précisément R_∞ . Cette détermination ($r_p^{(\mu\text{uonic})} = 0.84087(39)$ fm [1]) diffère significativement de celle du CODATA ($r_p^{(\text{CODATA}2014)} = 0.8751(61)$ fm [2]).

Les meilleures déterminations de r_p issue de la spectroscopie de H sont obtenues à partir de mesures de fréquences de transitions optiques. En supposant exacte la contribution QED, plusieurs transitions de H doivent donc être utilisées pour déterminer les deux grandeurs R_∞ et r_p . La valeur donnée par le CODATA est obtenue par un ajustement de type moindres carrés sur toute la spectroscopie de l'hydrogène, du deutérium et les études par diffusion électron-proton/deutéron. La mesure la plus précise sur H est réalisée pour la transition 1S-2S. Récemment, la transition 2S-4P a été remesurée à Garching avec une incertitude relative de 3.7×10^{-12} [3]. Combinée avec celle de 1S-2S, cette spectroscopie donne une valeur de $r_p^{(2S-4P)} = 0.8335(95)$ fm compatible avec celle de l'hydrogène muonique mais en net désaccord avec $r_p^{(\text{CODATA}2014)}$. Après plusieurs années d'efforts

[4-5], notre groupe a réalisé, en 2017, la spectroscopie de la transition 1S-3S de H au moyen d'une source laser continue à 205 nm [6], avec une incertitude relative de 9×10^{-13} .

2. SPECTROSCOPIE DE LA TRANSITION 1S-3S

La spectroscopie de la transition 1S-3S est faite sur un jet atomique d'hydrogène à 300 K. Cette transition, excitée par deux photons contra-propageants à 205 nm, est détectée par fluorescence 3S-2P à 656 nm. L'effet Doppler résiduel du 2^{ème} ordre (proportionnel à $-v^2$ où v est la vitesse des atomes) est mesuré en ajoutant un champ magnétique B perpendiculaire au jet atomique. Le champ électrique motionnel induit est proportionnel à v , et l'effet Stark quadratique associé à v^2 . La compensation de l'effet Doppler résiduel par l'effet Stark quadratique n'est pas complète mais en faisant varier B , il est possible de déterminer la distribution de vitesse des atomes et donc d'évaluer cet effet. Combinée à la mesure de la transition 1S-2S, notre étude fournit la valeur du rayon du proton $r_p^{(1S-3S)} = 0.877(13)$ fm [7]. Cette valeur est en très bon accord avec $r_p^{(CODATA2014)}$ mais diffère notablement de $r_p^{(2S-4P)}$ et $r_p^{(muonic)}$ (voir fig.1).

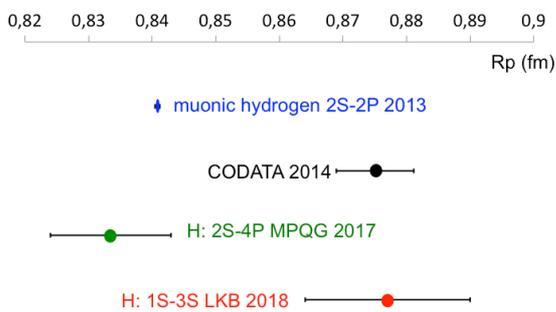


Fig. 1 : Comparaison des récentes déterminations de r_p

A ce jour, le désaccord entre ces différentes déterminations oblige encore à améliorer la spectroscopie de l'hydrogène. La transition 2S-2P, à 1 GHz, est en cours de mesure à l'université de York. La transition 1S-3S est aussi en cours d'étude à Garching mais avec une source laser ps à 205 nm. Ainsi pour la première fois, une même transition va être mesurée par deux groupes différents. Dans notre groupe, nous avons mis en place une source d'hydrogène à 77 K et recommencé la spectroscopie 1S-3S.

La spectroscopie de la transition 1S-4S, plus étroite que la précédente et jamais observée, sera ensuite réalisée. L'intérêt de cette étude est qu'une partie de la cascade radiative à partir du niveau 4S retombe sur le niveau 2S à partir duquel une détermination optique de la distribution de vitesse peut être menée. La comparaison de la mesure de la distribution de vitesse actuelle par champ magnétique et celle par spectroscopie à partir du niveau 2S permettra de valider la spectroscopie 1S-3S qui n'utilise que la méthode « du champ magnétique ». Les derniers résultats reliés à « l'énigme du rayon du proton » seront présentés à la conférence.

*adresse actuelle : National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA

#adresse actuelle : Institut Lumière Matière, UMR 5306 Université Lyon 1-CNRS, Université de Lyon, 69622 Villeurbanne cedex, France

RÉFÉRENCES

- [1] A. Antognini, F. Nez, K. Schuhmann et al, Science **339** (2013) 417.
- [2] P. Mohr, D. Newell, B. Taylor, Rev. Mod. Phys. **88** (2016) 035009.
- [3] A. Beyer, L. Maisenbacher, A. Matveev et al, Science **358** (2017) 79-85.
- [4] S. Galtier, Thèse Uni. Pierre et Marie Curie (2014), <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01080669>.
- [5] H. Fleurbaey, thèse, Uni. Pierre et Marie Curie (2017), <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01633631>.
- [6] S. Galtier, F. Nez, L. Julien, and F. Biraben, Opt. Commun. **324**, 34 (2014).
- [7] H. Fleurbaey, S. Galtier, S. Thomas et al, Phys. Rev. Lett. accepté pour publication

Remerciements : Les auteurs remercient O. Acef (LNE-SYRTE) pour le prêt de laser. Ce travail a été financé en partie par l'ANR (LABEX FIRST- TF (ANR-10-LABX-48), projet PROCADIS (ANR-2010-BLANC:04510)), l'Equipex REFIMEVE+ (ANR-11-EQPX-0039) et par le CNRS.

MOLECULAR ALIGNMENT INSIDE HELIUM NANODROPLETS

Patricia Vindel-Zandbergen¹, Ji Jiang², Manuel Barranco³, Marius Lewerenz², Christoph Meier¹, Martí Pf³, Nadine Halberstadt¹

¹ *Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 09, France*

² *Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi Echelle, Equipe de Chimie Théorique, 5 Boulevard Descartes 77454 Marne-la Vallée Cedex 2, France*

³ *Departament FQA, Facultat de Física, and IN2UB, Universitat de Barcelona, Diagonal 645, 08028 Barcelona, Spain*

patricia.vindel@irsamc.ups-tlse.fr

RÉSUMÉ

We present a quantum dynamical analysis of the impulsive alignment and subsequent rotational motion of the CH₃I-He complex. The emphasis is laid on the effect of the helium atom onto the coherent time evolution of the rotor states. The results are discussed with respect to experiments of non adiabatic alignment in superfluid He droplets where a strong dephasing of the rotor states was observed.

MOTS-CLEFS : *molecular alignment; He nanodroplets, rotational dynamics; molecules in laser fields*

The alignment of molecular species by strong non-resonant laser fields has been widely used within the last decade and has proven to be very useful in many applications in molecular science. For a detailed review of this methodology and its applications, see e.g.[1] and references therein.

After the strong pulse interaction leading to alignment, the subsequent dynamics is then given by the time evolution of the free rotor states, which for short times typically shows a strong dephasing, leading to an almost isotropic orientational distribution. However, for an isolated system, due to the discreteness of the spectrum, and the finite number of excited rotational states involved, the rotational wave packet rephases at well-defined later times, leading to the same aligned state as at the initial time (rotational revivals). This method has the advantage of providing a field free alignment of molecules at these times.

The phenomena of revivals depends crucially on the coherent evolution of the rotational wave packet, and as such forms a sensitive tool to study the interaction with a weakly interacting environment. In this perspective, the method of non adiabatic alignment within a helium droplet offers an extremely interesting aspect : to which extend can a superfluid helium environment lead to decoherence of the rotational states ? This question has recently been addressed experimentally, and as surprising result, they found the rotational dynamics much slower than that of isolated molecular species and the absence of the rotational revivals characteristic of gas phase molecules [2, 3, 4].

In this line, recent theoretical work studies the nonadiabatic alignment of a Van der Waals complex of linear molecules and a He atom by the numerical solution of the time dependent Schrödinger equation [5]. The main finding is that at intensities typical of non adiabatic alignment the rotational dynamics resemble that of isolated molecules, however, the complexes rapidly dissociate. In order to shine light on this process, we perform numerical simulations of the adiabatic laser alignment of CH₃I within the helium droplet.

As a first step, we analyze the CH₃I molecule with a single helium atom. To describe the intermolecular interaction, we use a potential composed of a sum over CH₃-He and I-He terms obtained by fitting to ab initio calculations. These potentials are then used for quantum dynamical propagations, including the laser pulses chosen according to the above cited experiments, to model the non adiabatic alignment,

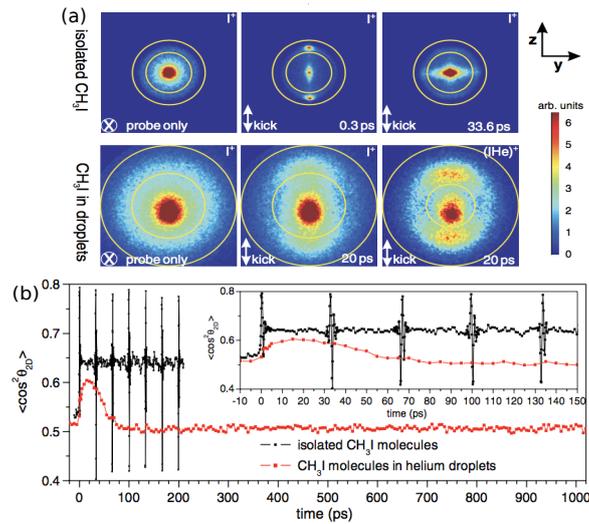


FIGURE 1 : Molecular alignment of isolated CH₃I molecules and CH₃I molecules in He nanodroplets. (a) I⁺ or (IHe)⁺ ion images. (b) Degree of alignment represented by $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$. Adapted from[2]

and its modification due to the presence of a single helium atom. Based on this full quantum mechanical wave packet describing the rotor dynamics together with the motion of the helium, we analyze the rotational decoherence by tracing out the degrees of freedom of the helium, and we directly model the observed alignment signal, to compare with the experiments presented in Ref.[2].

As an outlook, on the basis of this work, we discuss the possibility to model the molecular alignment within superfluid helium droplets within the framework of density functional theory, such as used by the Barcelona group[6].

RÉFÉRENCES

- [1] H. Stapelfeldt and T. Seideman, *Rev. Mod. Phys.* vol. 75 pp. 543-557, 2003
- [2] D. Pentlehner, J.H. Nielsen, A. Slenczka, K. Mølmer and H. Stapelfeldt, *Phys. Rev. Lett.* vol. 110 pp. 093002, 2013
- [3] D. Pentlehner, J.H. Nielsen, L. Christiansen, A. Slenczka and H. Stapelfeldt, *Phys. Rev. A* vol. 87 pp. 063401, 2013
- [4] L. Christiansen, J.H. Nielsen, D. Pentlehner, J.G. Underwood and H. Stapelfeldt, *Phys. Rev. A* vol. 92 pp. 053415, 2015
- [5] A.A. Søndergaard, R.E. Zillich and H. Stapelfeldt, *J. Chem. Phys.* vol. 147 pp. 074304, 2017
- [6] M. Barranco *et al.*, *J. Low Temp. Phys.* vol. 142 p. 1, 2006

RAYONS X - OUTIL DE CHOIX POUR L'EXPLORATION DE PROCESSUS FONDAMENTAUX

Catalin Miron¹

¹ LIDYL, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

catalin.miron@cea.fr

Résumé

De nouveaux phénomènes ont été observés et de nouvelles voies de recherche ouvertes récemment grâce à la disponibilité de lignes de lumière de rayons X à hautes performances : flux et résolution spectrale aux synchrotrons de 3^{ème} génération, intensité et brièveté des impulsions aux lasers à électrons libres (LEL). Quelques exemples seront discutés.

Mots-clefs : *rayons X ; rayonnement synchrotron ; débat Bohr-Einstein ; effet Doppler rotationnel*

1. Introduction

Grâce à la disponibilité récente de nouvelles sources de rayons X, de nouvelles voies de recherche ont pu être ouvertes et des phénomènes physiques nouveaux ont pu être mis en évidence. A l'origine de ces contributions sont notamment les nouveaux centres de rayonnement synchrotron, dits de 3^{ème} génération, disposant de lignes de lumière de rayons X à hautes performances, avec des gains significatifs en termes de flux de photons disponibles (quelques 10^{13} *ph/s*) dans 0.1% de la bande passante. Ces niveaux de performances permettent la mise en œuvre de spectroscopies résonnantes (d'électrons, de fluorescence) à très haute résolution, et l'observation de processus de très faible section efficace, même pour des échantillons en phase diluée (atomes, molécules, ions, agrégats et nanoparticules notamment).

En parallèle, les lasers à électrons libres (LEL) dans le domaine des rayons X se sont aussi développés grâce à des accélérateurs linéaires, notamment aux Etats Unis (LCLS@SLAC à Stanford, CA) et au Japon (SACLA à SPring-8), et plus récemment en Europe avec FERMI à ELETTRA (Trieste, Italie), premier LEL pompé par laser, et depuis moins d'un an l'infrastructure Européenne de recherche European XFEL à Hamburg en Allemagne. Ces outils de recherche sont complémentaires aux synchrotrons, les impulsions de lumière produites étant extrêmement courtes (quelques fs seulement) et intenses. Ils offrent alors non seulement la possibilité d'entrer dans le champ nouveau de l'optique non-linéaire de rayons X, mais permettent aussi l'exploration des phénomènes physiques ultra-rapides, notamment lorsque les impulsions LEL sont combinées à des impulsions laser optiques synchronisées dans des arrangements de type pompe-sonde.

2. Quelques exemples

Les spectroscopies de rayons X-mous d'espèces isolées représentent des outils très puissants pour l'exploration de leur structure et de leurs propriétés [1]. Il est en particulier possible de sonder les dynamiques ultra-rapides générées par l'excitation en couche interne grâce aux spectroscopies électroniques [2]. La spectroscopie d'électrons à très haute résolution et les mesures de coïncidence entre des électrons de haute énergie (Auger) et des ions, avec détermination des quantités de mouvement de toutes les particules émises, sont mises en œuvre de façon routinière dans le domaine des rayons X-mous sur la ligne de lumière PLEIADES du Synchrotron SOLEIL.

Par exemple, à l'aide de PLEIADES, nous avons été capables de mettre en évidence expérimentalement l'existence du pendant rotationnel de l'effet Doppler translationnel, qui est

montré affecter tous les spectres d'électrons moléculaires [3]. Comme conséquence de l'effet Doppler rotationnel, nous avons également démontré que l'utilisation de rayons X polarisés confère un caractère local même à la photoionisation moléculaire en couche de valence [4], autrement non-sélective, et révèle le caractère des orbitales moléculaires mises en jeu [5].

En tirant profit des ses performances accrues, nous avons aussi développé autour de PLEIADES une activité de recherche visant à caractériser les propriétés fondamentales d'espèces en phase gazeuse de complexité croissante, des molécules [6], aux agrégats et nanoparticules (voir Réf. [7] pour une revue), y compris d'objets amorphes comme la suie [8]. Enfin, nous avons utilisé des expériences de coïncidence pour extraire les corrélations vectorielles entre des électrons Auger analysés et les ions fragments, ce qui nous a permis d'étudier des phénomènes quantiques fondamentaux à l'échelle moléculaire dans des systèmes modèles [9], ou bien d'étudier les mécanismes de dissociation ultra-rapide (fs) de molécules polyatomiques [10].

L'utilisation d'impulsions LEL ultracourtes et intenses ouvre la voie à une nouvelle typologie d'études, de l'optique non-linéaire de rayons X à l'imagerie cohérente d'objets uniques. Nos études récentes ont permis de contribuer à une compréhension plus fine des mécanismes à la base des dommages moléculaires induits par le rayonnement LEL [11, 12], et de mettre en évidence de nouveaux processus de relaxation en cascade, qui peuvent être responsables de tels dommages [13].

Conclusion

Ce travail présente une sélection de résultats obtenus pour des espèces isolées grâce aux spectroscopies d'électrons ou de coïncidence auprès de nouvelles sources de rayons X, comme le Synchrotron SOLEIL ou les sources LEL LCLS et SACLA.

Références

- [1] C. Miron and P. Morin, "High-Resolution Inner-Shell Photoionization, Photoelectron and Coincidence Spectroscopy", in *Handbook of High-Resolution Spectroscopy*, Vol. 3, Edited by M. Quack and F. Merkt, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, p. 1655-1690 (2011).
- [2] C. Miron, M. Patanen and S. Benkoula, "Synchrotron-Radiation-Based Soft X-ray Electron Spectroscopies Applied to Structural and Chemical Characterization of Isolated Species, from Molecules to Nano-objects", in *Synchrotron Radiation in Materials Science : Light Sources, Techniques, and Applications*, Vol. 1, Edited by C. Fan and Z. Zhao, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, p. 321-355 (February, 2018). DOI: 10.1002/9783527697106.ch10
- [3] T.D. Thomas, E. Kukk, K. Ueda, T. Ouchi, K. Sakai, T.X. Caroll, C. Nicolas, O. Travnikova, C. Miron, *Phys. Rev. Lett.* **106** (19), 193009 (2011).
- [4] C. Miron, Q. Miao, C. Nicolas, J. D. Bozek, W. Andrałojć, M. Patanen, G. Simões, O. Travnikova, H. Ågren, F. Gel'mukhanov, *Nature Communications* **5**, 3816 (2014). DOI: 10.1038/ncomms4816
- [5] Q. Miao, O. Travnikova, F. Gel'mukhanov, V. Kimberg, Y.-P. Sun, T. D. Thomas, C. Nicolas, M. Patanen, C. Miron, *J. Phys. Chem. Lett.* **6**, 1568–1572 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b00325
- [6] C. Miron, C. Nicolas, O. Travnikova, P. Morin, Y. Sun, F. Gel'mukhanov, N. Kosugi, V. Kimberg, *Nature Physics* **8** (2), 135–138 (2012). DOI : 10.1038/nphys2159.
- [7] C. Miron and M. Patanen, *Adv. Mater.* **26**, 7911–7916 (2014). DOI: 10.1002/adma.201304837
- [8] F.-X. Ouf *et al.*, *Scientific Reports* **6**, 36495 (2016). DOI: 10.1038/srep36495.
- [9] X.-J. Liu, Q. Miao, F. Gel'mukhanov, M. Patanen, O. Travnikova, C. Nicolas, H. Ågren, K. Ueda, C. Miron, *Nature Photonics* **9**, 120–125 (2015). DOI: 10.1038/nphoton.2014.289
- [10] O. Travnikova, V. Kimberg, R. Flammini, X.-J. Liu, M. Patanen, C. Nicolas, S. Svensson, C. Miron, *J. Phys. Chem. Lett.* **4**, 2361–2366 (2013). DOI : 10.1021/jz4011288
- [11] B. F. Murphy *et al.*, *Nature Communications* **5**, 4281 (2014). DOI:10.1038/ncomms5281
- [12] K. Nagaya *et al.*, *Phys. Rev. X* **6**, 021035 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevX.6.021035.
- [13] K. Nagaya *et al.*, *Nature Communications* **7**, 13477 (2016). DOI: 10.1038/ncomms13477

INVARIANCE OF THE MEAN PATH LENGTH IN LIGHT-SCATTERING MEDIA

Romolo Savo^a, Romain Pierrat^a, Ulysse Najar^a, Rémi Carminati^a, Stefan Rotter^a,
Sylvain Gigan^a

¹Laboratoire Kastler Brossel, École Normale Supérieure–Paris Sciences et Lettres (PSL)
Research University, CNRS, Université Pierre et Marie Curie–Sorbonne Universités,
Collège de France, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France.

²École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, PSL
Research University, CNRS, Institut Langevin, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France.

³Institute for Theoretical Physics, Vienna University of Technology (TU Wien), A-1040
Vienna, Austria.

sylvain.gigan@lkb.ens.fr

RÉSUMÉ

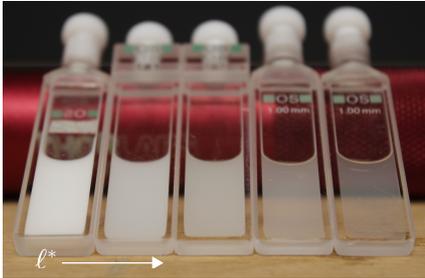
We experimentally demonstrate that the mean path length of scattered light in disordered media is independent of the medium's micro-structure, but it only depends on the medium's outer geometry

MOTS-CLEFS : *scattering, mesoscopic physics, waves in complex media*

1. INTRODUCTION

Light scattering properties are well known to be strongly dependent on the medium's micro-structure, in particular on whether a medium is homogeneous, ordered or disordered. As opposite to this general rule, a recent theoretical study pointed out that a very fundamental property of wave transport is extremely robust to the structure of the underlying medium [Specifically, it has been shown that, when all modes in a medium are equally excited, the mean path length $\langle s \rangle$ associated with wave scattering through a medium only depends on the medium's boundary geometry, but not on its internal micro-structure. The mean path length is found to be $\langle s \rangle = v_e \langle t \rangle = 4V/\Sigma$ for a three-dimensional geometry of volume V and surface Σ , where v_e is the energy velocity [2]. This result was derived by generalizing an invariance property first found for random walks [3] to arbitrary wave scattering scenarios [2] and has its root in the Equipartition Theorem.

a)



b)

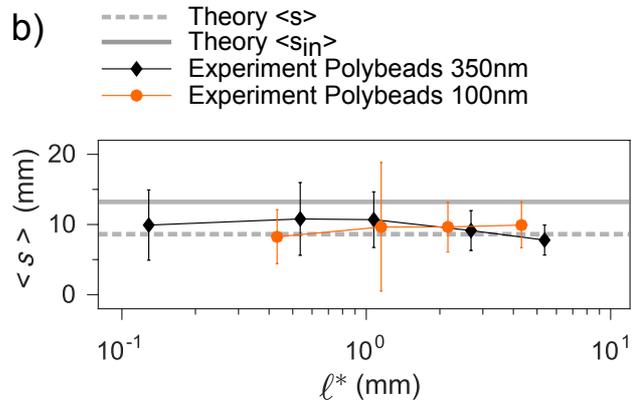


Fig. 1: (a) Colloidal solutions used in the experiment, here contained in 1 mm thick slab cuvettes. The arrow indicates increasing transport mean free paths l^* , i.e. decreasing scattering strength. (b) Measured mean optical path length as a function of the transport mean free path. The dashed gray

line indicates the expected value calculated from pure geometrical considerations, $\langle s \rangle = 2R$. The solid gray line is computed by Monte Carlo simulations and includes the effect of internal reflections. Black diamonds represent measurements on polystyrene particles with diameter 360 nm and anisotropy g of 0.8. Orange circles represent measurements on polystyrene particles with diameter 100 nm and anisotropy g of 0.1. (Figures from [1]).

2. RESULTS

We consider the case of a fully disordered medium, in which the crossover between systems with different degrees of disorder can be described by the transport mean free path l^* . Applying the theoretical predictions of Eq.1 to this case would mean that any change of l^* should leave the mean path length invariant. We investigate multiple scattering of light in colloidal suspensions of particles in water and tune the mean free path by varying the concentration and size of the particles (see Fig1.a). We develop a reverse version of diffusing-wave-spectroscopy to measure the mean length of light trajectories through the temporal decorrelation of the optical speckle pattern. As shown in Fig.1b we unambiguously observe the invariance of the optical mean path length over almost two orders of magnitude of scattering strength - from a nearly transparent to a very opaque system.

CONCLUSION

The observed invariance sets rigid bounds for the optical path length enhancement in multiple scattering media and provides insights for the optimal design of light trapping and light storage devices. It crucially relies on the validity of the Equipartition Theorem and thus provides a stringent test of this fundamental principle in scattering media. Major limitations to the observation of this invariance are expected to be a strong absorption and a narrow frequency averaging in case of medium with a highly-structured density-of-states (DOS). We also emphasize that our results are not restricted to light propagation, but apply basically to all wave scattering problems.

REFERENCES

- [1] R. Savo, R. Pierrat, U. Najar, R. Carminati, S. Rotter, and S. Gigan, "Observation of mean path length invariance in light-scattering media," *Science*, vol. 358, no. 6364, pp. 765–768, 2017.
- [2] R. Pierrat, P. Ambichl, S. Gigan, A. Haber, R. Carminati, and S. Rotter, "Invariance property of wave scattering through disordered media," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, p. 201417725, Nov. 2014.
- [3] S. Blanco and R. Fournier, "An invariance property of diffusive random walks," *Europhys. Lett.*, vol. 61, no. 2, p. 168, 2003.