L'annuaire du Collège de France
Cours et travaux

114 | 2015
Annuaire du Collège de France 2013-2014

Physique de la matière condensée

Antoine Georges

Édition électronique
URL : https://journals.openedition.org/annuaire-cdf/11889
DOI : 10.4000/annuaire-cdf.11889
ISBN : 978-2-7226-0448-3
ISSN : 2109-9227

Éditeur
Collège de France

Édition imprimée
Date de publication : 1 juillet 2015
Pagination : 181-186
ISBN : 978-2-7226-0414-8
ISSN : 0069-5580

Référence électronique
Antoine Georges, « Physique de la matière condensée », *L'annuaire du Collège de France* [En ligne], 114 | 2015, mis en ligne le 23 mai 2016, consulté le 22 août 2022. URL : http://journals.openedition.org/annuaire-cdf/11889 ; DOI : https://doi.org/10.4000/annuaire-cdf.11889

Tous droits réservés

Physique de la matière condensée

M. Antoine GEORGES, professeur

COURS ET SÉMINAIRE.
PETITS SYSTÈMES THERMOÉLECTRIQUES :
CONDUCTEURS MÉSOSCOPIQUES ET GAZ D'ATOMES FROIDS

Le cours s'est déroulé du 5 novembre au 18 décembre 2013 [a]. Il s'agit du second volet d'un cycle de deux ans consacré aux effets thermoélectriques : après une première année consacrée surtout aux matériaux « massifs » et à leurs applications, le cours de cette année a mis l'accent sur les développements récents faisant intervenir ces effets dans les petits conducteurs quantiques, et a décrit leur première mise en évidence dans les gaz atomiques ultra-froids. Après quelques rappels généraux sur ces effets, un premier cours a été consacré à établir l'expression des coefficients thermoélectriques dans le formalisme de Landauer-Büttiker. Un second cours a décrit les expériences sur les contacts quantiques ponctuels et les points quantiques, et leur interprétation théorique dans le cadre de ce formalisme. Après des rappels sur les aspects thermodynamiques et l'efficacité d'un dispositif thermoélectrique, on a montré au troisième cours comment améliorer cette efficacité par filtrage en énergie (Dresselhaus, Mahan-Sofo). Le quatrième cours s'est intéressé au transport de chaleur dans le régime quantique et à ses liens avec la théorie de l'information. Dans un cinquième cours, des développements très récents concernant les effets thermoélectriques dans les gaz atomiques ultra-froids ont été abordés, et un dernier cours a considéré le transport d'entropie et le « second son » dans les superfluides.

Ces cours ont été complétés et enrichis par une série de séminaires [b]. Plusieurs d'entre eux (donnés par J.-L. Pichard, B. Sothmann, L. Molenkamp) ont concerné les effets thermoélectriques dans les conducteurs mésoscopiques. Lors de sa venue,

---

a. Les enregistrements audio et les supports de cours sont disponibles sur le site internet du Collège de France : http://www.college-de-france.fr/site/antoine-georges/course-2013-2014.htm [NdÉ].

b. Les enregistrements audio du séminaire sont disponibles sur le site internet du Collège de France : http://www.college-de-france.fr/site/antoine-georges/seminar-2013-2014.htm [NdÉ].

L. Molenkamp a également donné un second séminaire faisant le point des recherches expérimentales actuelles sur les « isolants topologiques ». O. Bourgeois a abordé la nano-phononique et le transport thermique dans les nano-systèmes. J.-Ph. Brantut et Ch. Grenier ont présenté des travaux récents, expérimentaux et théoriques, sur l'observation des effets couplés de transport de particules et d'entropie dans les gaz atomiques ultra-froids. Enfin, R. Grimm a décrit la première observation expérimentale du second son dans ces gaz.

Enseignement à l'étranger et autres enseignements

Cours à l'Indian Institute of Sciences et à l'International Centre for Theoretical Sciences (Bangalore, Inde), Chandrasekhar Lectures, janvier 2014.

Cours à l'Université de Bonn (Allemagne) dans le cadre de la chaire Ernst Robert Curtius, mai 2014.

Enseignements à l'École Polytechnique : cours de niveau Master 1 « Physique quantique des électrons dans les solides » (A. Georges, S. Biermann, A. Subedi), septembre-décembre 2013.

Enseignement au Master « Concepts Fondamentaux de la Physique » : cours « Fermions et bosons fortement corrélés » (A. Georges avec X. Leyronas, C. Mora, O. Parcollet), septembre-décembre 2013.

Organisation de colloques

Organisation de la seconde rencontre scientifique du programme ERC-SYNERGY QMAC (Frontiers in Quantum Materials Research) à la Fondation Hugot du Collège de France (28-29 janvier 2014).

Co-organisation de l'école doctorale et post-doctorale « Strongly correlated systems – from models to materials », International Centre for Theoretical Sciences, Bangalore, Inde (janvier 2014).

Distinctions

Le Hamburg Prize for Theoretical Physics de la Joachim Herz Stiftung a été décerné à Antoine Georges.

Notre équipe a été associée (2014-) à la Simons Foundation collaboration on the Many-Electron Problem.

A. Georges : *Chandrasekhar Lectures*, Bangalore, Inde (janvier 2014).

Activités de recherche de l'équipe de recherche « Matériaux quantiques à fortes corrélations »

L'équipe est rattachée au Centre de physique théorique – CPHT (CNRS UMR-7644) de l'École Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex. Une évolution majeure cette année a été l'ouverture, au printemps 2014, de l'Institut de physique du Collège de France, dans le bâtiment E récemment rénové. Notre équipe y est désormais principalement localisée.

Membres de l'équipe de chaire (2013-2014) : Michel Ferrero, Antoine Georges, Leonid Pourovskii (permanents) ; Evgeny Kozik, Oleg Peil, Alaska Subedi, Akiyuki

Tokuno (postdoctorants). Membres associés à l'équipe de chaire : Silke Biermann, Olivier Parcollet, Thomas Ayral, Sophie Chauvin, Philipp Hansmann, Priyanka Seth, Ambroise van Roekeghem [1].

Les *matériaux à fortes corrélations quantiques* sont caractérisés par l'échec des descriptions en termes de fonctions d'ondes de particules indépendantes. Cette situation est fréquente dans le cas de matériaux à bandes étroites, dans lesquels les électrons « hésitent » entre un comportement itinérant et un comportement localisé. C'est le cas des métaux de transition (couches 3d, 4d, 5d) et surtout de leurs oxydes, des composés de terres rares et d'actinides (couches 4f et 5f), et de nombreux solides moléculaires. Par ailleurs, les développements expérimentaux de ces quinze dernières années dans le domaine des gaz atomiques ultra-froids permettent aujourd'hui de réaliser de véritables « solides artificiels » constitués par des atomes piégés dans un potentiel lumineux périodique (réseau optique). Ces nouveaux systèmes permettent d'explorer la physique des fortes corrélations quantiques avec un degré de contrôle et dans des régimes jusqu'alors inaccessibles.

Les activités de notre équipe de recherche s'organisent au sein du vaste domaine de la « matière quantique à fortes corrélations » autour de plusieurs directions différentes, depuis des aspects fondamentaux jusqu'à des questions liées aux propriétés de matériaux particuliers. Pour 2013-2014, trois questions parmi les plus nouvelles abordées par notre équipe au sein de cette thématique générale sont résumées ci-dessous.

Réponse optique des liquides de Fermi fortement corrélés

Dans de nombreux systèmes, le comportement de basse température/basse énergie de fermions en interactions est décrit par la « théorie des liquides de Fermi », introduite par Landau au milieu du siècle dernier. Cette théorie prédit en particulier une forme bien particulière du taux de diffusion inélastique des quasi-particules, qui varie comme le carré de l'énergie et de la température. Curieusement, les conséquences de cette théorie pour le comportement de la conductivité optique n'avaient pas été, jusqu'à ce jour, mises en évidence de manière complète du point de vue expérimental : dans le régime où la dépendance en énergie domine, des déviations bien spécifiques à la loi de Drude doivent être observées. Dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Genève (équipe expérimentale de Dirk van der Marel et C. Berthod), nous avons pu clarifier les lois d'échelle universelles attendues et montrer qu'elles étaient obéies dans l'oxyde Sr_2RuO_4, qui constitue un exemple canonique de comportement de liquide de Fermi parmi les oxydes de métaux de transition (Berthod *et al.*, 2013 ; Stricker *et al.*, 2014).

Contrôle des solides par excitation lumineuse résonante et « phononique non-linéaire »

Le contrôle des fonctionnalités des oxydes de métaux de transition est désormais au centre de la recherche dans ce domaine. Ce contrôle passe d'abord par celui de la structure du matériau, dont découlent les propriétés électroniques. Au-delà de la

1. Voir le site internet de l'équipe : http://www.cpht.polytechnique.fr/cpht/correl/mainpage.htm

synthèse de nouveaux composés par les méthodes de la chimie, plusieurs voies de contrôle « physique » sont actuellement explorées, comme la fabrication d'hétérostructures d'oxydes permettant d'agir via des contraintes mécaniques sur les caractéristiques électroniques essentielles : largeur de bande, énergies de champ cristallin, etc. (voir Peil *et al.*, 2014 pour un travail récent de notre équipe dans ce domaine). Une direction de recherche particulièrement originale s'est développée depuis quelques années, qui vise à contrôler ces matériaux en excitant de manière sélective certains modes structuraux par des impulsions lumineuses Tera-Hertz en résonance avec ces modes. Les expériences pionnières menées par Andrea Cavalleri et ses collaborateurs ont montré qu'il est possible de changer de manière transitoire la structure du matériau, induisant par exemple une transition isolant-métal (Rini *et al.*, 2007), ou plus récemment, augmentant ainsi la cohérence d'un matériau supraconducteur. Cette direction de recherche est au cœur du programme « Frontiers in Quantum Materials Control » (ERC Synergy Q-MAC) dont notre équipe est l'un des quatre partenaires. Nous avons, au cours de cette année, élaboré une compréhension théorique détaillée et quantitative du mécanisme de « phononique non-linéaire » qui permet de modifier la structure par ces impulsions lumineuses. Comme l'ont proposé Först *et al.* (2011), le phonon excité par l'impulsion a des couplages non-linéaires avec d'autres modes structuraux n'ayant pas de moment dipolaire (donc non directement excitables). Ce couplage non-linéaire peut conduire à un déplacement de ces modes, correspondant à un changement de structure. Notre approche théorique (Subedi *et al.*, 2014), fondée sur des arguments de symétrie et sur des calculs *ab initio* permet de prévoir quels modes sont déplacés et comment la structure change. Cette méthode a par exemple permis de décrire la structure expérimentale résolue en temps du supraconducteur YBCO soumis à de telles impulsions, récemment mesurée par diffraction X résolue en temps (Mankowsky *et al.*, 2014)

Effets thermoélectriques dans les gaz atomiques ultra-froids

Avec Charles Grenier et Corinna Kollath (arXiv :1209.3942), nous avons proposé la mise en évidence et l'étude d'effets « thermoélectriques » (c'est-à-dire d'effets couplant transport de particules et transport d'entropie) dans les gaz atomiques ultra-froids. Cette proposition théorique s'est prolongée par une collaboration étroite avec l'équipe de Tilman Esslinger et C. Brantut à l'ETH-Zurich. En utilisant la géométrie de « constriction » entre deux réservoirs récemment mise au point dans cette équipe, un protocole précis pour mettre en évidence les effets thermoélectriques a été proposé. Ce protocole est un analogue, en régime transitoire, de l'effet Seebeck. Ce protocole a permis à l'équipe de l'ETH d'observer expérimentalement ces effets pour la première fois (Brantut *et al.*, *Science*, 2013) et de réaliser une sorte de petite « machine thermique » utilisant les gaz atomiques froids.

Principales collaborations

De nombreux travaux de notre équipe de recherche s'inscrivent dans le cadre de collaborations, avec des équipes théoriques ou expérimentales. En 2013-2014, ces collaborations ont impliqué principalement les institutions suivantes : Universités de Fribourg (P. Werner) et Genève (J.-M. Triscone, D. van der Marel, F. Baumberger, C. Berthod, D. Jaccard), ETH-Zurich (équipes de T. Esslinger et Ph. De Forcrand),

Université de Bonn (C. Kollath), Institut Joszef Stefan, Ljubljana (J. Mravlje), Max Planck Institute for Structural Dynamics, Hamburg (A. Cavalleri), Université de Tokyo (H. Wadati et A. Fujimori), University of California, Santa Cruz (B.S. Shastry), Columbia University (A.J. Millis).

PUBLICATIONS DE L'ÉQUIPE

AKERLUND O., DE FORCRAND P., GEORGES A. et WERNER P., « Extended Mean Field Study of Complex Phi4-theory at Finite Density and Temperature », *Physical Review D*, 90(6), septembre 2014, 065008, DOI : 10.1103/PhysRevD.90.065008.

AKERLUND O., DE FORCRAND P., GEORGES A. et WERNER P., « Dynamical Mean Field Approximation Applied to Quantum Field Theory », *Physical Review D*, 88(12), décembre 2013, 125006, DOI : 10.1103/PhysRevD.88.125006.

BERTHOD C., MRAVLJE J., DENG X., ŽITKO R., VAN DER MAREL D. et GEORGES A., « Non-Drude Universal Scaling Laws for the Optical Response of Local Fermi Liquids », *Physical Review B*, 87(11), mars 2013, 115109, DOI : 10.1103/PhysRevB.87.115109.

BRANTUT J.-P., GRENIER C., MEINEKE J., STADLER D., KRINNER S., KOLLATH C., ESSLINGER T. et GEORGES A., « A Thermoelectric Heat Engine with Ultracold Atoms », *Science*, 342(6159), novembre 2013, 713-715, DOI : 10.1126/science.1242308.

CATALANO S., GIBERT M., BISOGNI V., PEIL O.E., HE F., SUTARTO R., VIRET M., ZUBKO P., SCHERWITZL R., GEORGES A., SAWATZKY G.A., SCHMITT T. et TRISCONE J.-M., « Electronic Transitions in Strained $SmNiO_3$ Thin Films », *APL Materials*, 2(11), novembre 2014, 116110, DOI : 10.1063/1.4902138.

DENG X., MRAVLJE J., ZITKO R., FERRERO M., KOTLIAR G. et GEORGES A., « How Bad Metals Turn Good: Spectroscopic Signatures of Resilient Quasiparticles », *Physical Review Letters*, 110(8), février 2013, 086401, DOI : 10.1103/PhysRevLett.110.086401.

GEORGES A. et GIAMARCHI T., « Strongly Correlated Bosons and Fermions in Optical Lattices », dans SALOMON C., SHLYAPNIKOV G.V. et CUGLIANDOLO L.F. (éd.), *Many-Body Physics with Ultracold Gases: Lecture Notes of the Les Houches Summer School July 2010*, nº 94, Oxford, Oxford University Press, 2012.

GEORGES A., DE' MEDICI L. et MRAVLJE J., « Strong Electronic Correlations from Hund's Coupling », LANGER J.S. (éd.), *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 4, 2013, 137-178, DOI : 10.1146/annurev-conmatphys-020911-125045.

GRENIER C., GEORGES A. et KOLLATH C., « Peltier Cooling of Fermionic Quantum Gases », *Physical Review Letters*, 113(20), novembre 2014, 200601, DOI : 10.1103/PhysRevLett.113.200601.

GRENIER C., KOLLATH C. et GEORGES A., « Quantum oscillations in ultracold Fermi gases: Realizations with rotating gases or artificial gauge fields », *Physical Review A*, 87(3), mars 2013, DOI : 10.1103/PhysRevA.87.033603.

LUO Y., POUROVSKII L., ROWLEY S.E., LI Y., FENG C., GEORGES A., DAI J., CAO G., XU Z., SI Q. et ONG N.P., « Heavy-fermion quantum criticality and destruction of the Kondo effect in a nickel oxypnictide », *Nature Materials*, 13(8), août 2014, 777-781, DOI : 10.1038/nmat3991.

MANKOWSKY R., SUBEDI A., FOERST M., MARIAGER S.O., CHOLLET M., LEMKE H.T., ROBINSON J.S., GLOWNIA J.M., MINITTI M.P., FRANO A., FECHNER M., SPALDIN N.A., LOEW T., KEIMER B., GEORGES A. et CAVALLERI A., « Nonlinear lattice dynamics as a basis for enhanced superconductivity in $YBa_2Cu_3O_{6.5}$ », *Nature*, 516(7529), décembre 2014, 71-U150, DOI : 10.1038/nature13875.

MIRZAEI S.I., STRICKER D., HANCOCK J.N., BERTHOD C., GEORGES A., VAN HEUMEN E., CHAN M.K., ZHAO X., LI Y., GREVEN M., BARISIC N. et VAN DER MAREL D., « Spectroscopic evidence for Fermi liquid-like energy and temperature dependence of the relaxation rate in the pseudogap phase of the cuprates », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(15), avril 2013, 5774-5778, DOI : 10.1073/pnas.1218846110.

PEIL O.E., FERRERO M. et GEORGES A., « Orbital polarization in strained $LaNiO_3$: Structural distortions and correlation effects », *Physical Review B*, 90(4), juillet 2014, 045128, DOI : 10.1103/PhysRevB.90.045128.

POLETTI D., BARMETTLER P., GEORGES A. et KOLLATH C., « Emergence of Glasslike Dynamics for Dissipative and Strongly Interacting Bosons », *Physical Review Letters*, 111(19), novembre 2013, DOI : 10.1103/PhysRevLett.111.195301.

POUROVSKII L.V., HANSMANN P., FERRERO M. et GEORGES A., « Theoretical Prediction and Spectroscopic Fingerprints of an Orbital Transition in $CeCu_2Si_2$ », *Physical Review Letters*, 112(10), mars 2014, 106407, DOI : 10.1103/PhysRevLett.112.106407.

REN Z., POUROVSKII L.V., GIRIAT G., LAPERTOT G., GEORGES A. et JACCARD D., « Giant Overlap between the Magnetic and Superconducting Phases of $CeAu_2Si_2$ under Pressure », *Physical Review X*, 4(3), 031055, septembre 2014, DOI : 10.1103/PhysRevX.4.031055.

SAKAI S., BLANC S., CIVELLI M., GALLAIS Y., CAZAYOUS M., MÉASSON M.-A., WEN J.S., XU Z.J., GU G.D., SANGIOVANNI G., MOTOME Y., HELD K., SACUTO A., GEORGES A. et IMADA M., « Raman-Scattering Measurements and Theory of the Energy-Momentum Spectrum for Underdoped $Bi_2Sr_2CaCuO_{8+\delta}$ Superconductors: Evidence of an s-Wave Structure for the Pseudogap », *Physical Review Letters*, 111(10), septembre 2013, 107001, DOI : 10.1103/PhysRevLett.111.107001.

STRICKER D., MRAVLJE J., BERTHOD C., FITTIPALDI R., VECCHIONE A., GEORGES A. et VAN DER MAREL D., « Optical Response of Sr_2RuO_4 Reveals Universal Fermi-Liquid Scaling and Quasiparticles Beyond Landau Theory », *Physical Review Letters*, 113(8), août 2014, 087404, DOI : 10.1103/PhysRevLett.113.087404.

SUBEDI A., CAVALLERI A. et GEORGES A., « Theory of nonlinear phononics for coherent light control of solids », *Physical Review B*, 89(22), juin 2014, 220301, DOI : 10.1103/PhysRevB.89.220301.

TOKUNO A. et GEORGES A., « Ground states of a Bose–Hubbard ladder in an artificial magnetic field: field-theoretical approach », *New Journal of Physics*, 16(7), juillet 2014, 073005, DOI : 10.1088/1367-2630/16/7/073005.

TOMCZAK J.M., POUROVSKII L.V., VAUGIER L., GEORGES A. et BIERMANN S., « Rare-earth vs. heavy metal pigments and their colors from first principles », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3), janvier 2013, 904-907, DOI : 10.1073/pnas.1215066110.

DE LA TORRE A., HUNTER E.C., SUBEDI A., MCKEOWN WALKER S., TAMAI A., KIM T.K., HOESCH M., PERRY R.S., GEORGES A. et BAUMBERGER F., « Coherent Quasiparticles with a Small Fermi Surface in Lightly Doped $Sr_3Ir_2O_7$ », *Physical Review Letters*, 113(25), décembre 2014, 256402, DOI : 10.1103/PhysRevLett.113.256402.

WADATI H., MRAVLJE J., YOSHIMATSU K., KUMIGASHIRA H., OSHIMA M., SUGIYAMA T., IKENAGA E., FUJIMORI A., GEORGES A., RADETINAC A., TAKAHASHI K.S., KAWASAKI M. et TOKURA Y., « Photoemission and DMFT study of electronic correlations in $SRMoO_3$: Effects of Hund's rule coupling and possible plasmonic sideband », *Physical Review B*, 90(20), novembre 2014, 205131, DOI : 10.1103/PhysRevB.90.205131.

ŽITKO R., HANSEN D., PEREPELITSKY E., MRAVLJE J., GEORGES A. et SHASTRY B.S., « Extremely correlated Fermi liquid theory meets dynamical mean-field theory: Analytical insights into the doping-driven Mott transition », *Physical Review B*, 88(23), décembre 2013, 235132, DOI : 10.1103/PhysRevB.88.235132.