

Annuaire du Collège de France

122^e année

2021
2022

Résumé des cours et travaux



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

Antoine Georges

Membre de l’Institut (Académie des sciences),
professeur au Collège de France

La série de cours « Des métaux étranges aux trous noirs : autour des modèles SYK » est disponible, en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/des-metaux-étranges-aux-trous-noirs-autour-des-modeles-syk>), ainsi la série de quatre conférences donnée par le professeur Subir Sachdev « Schwarzian theory of SYK fluctuations and T-linear resistivity » (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/seminaire/statistical-mechanics-of-metals-without-quasiparticles-and-charged-black-holes/schwarzian-theory-of-syk-fluctuations-and-linear-resistivity>), et le colloque intitulé « Strange metals, SYK models and beyond » (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/colloque/strange-metals-syk-models-and-beyond>).

ENSEIGNEMENT

COURS - DES MÉTAUX ÉTRANGES AUX TROUS NOIRS : AUTOUR DES MODÈLES SYK

Le cycle de cours et séminaires de cette année avait pour titre : « Des métaux étranges aux trous noirs : autour des modèles Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) » et concernait certains systèmes quantiques dans lesquels les excitations de basse énergie ne peuvent être décrites en termes de quasiparticules. Les propriétés de transport de ces systèmes sont inhabituelles et différentes d'un liquide de Fermi usuel (« métal étrange »), avec par exemple une résistivité dépendant linéairement de la température. La dissipation dans ces systèmes est « planckienne », c'est-à-dire aussi rapide

A. Georges, « Physique de la matière condensée », *Annuaire du Collège de France. Résumé des cours et travaux*, 122^e année : 2021-2022, 2025, p. 97-102, <https://journals.openedition.org/annuaire-cdf/20442>.

que le permet la mécanique quantique. Le cours était centré sur une classe de modèles introduits par Sachdev et Ye, puis Kitaev (SYK) et leurs généralisations, qui permettent de comprendre ces phénomènes dans un cadre théorique précis. De plus, une correspondance remarquable a été établie entre ces modèles et certaines théories de la gravitation quantique. Ces aspects ont été plus particulièrement abordés dans le cadre de quatre conférences données par le professeur Subir Sachdev (Harvard University), invité par l'assemblée du Collège de France.

Le déroulement des cours et des interventions du conférencier invité a été le suivant :

- « Métaux étranges, dissipation planckienne, modèles SYK : introduction » : cours 1 et 2, le 10 mai 2022;
- « Entropie et asymétrie spectrale des modèles SYK » : cours 3, le 17 mai 2022;
- « *Beckenstein-Hawking entropy of a black hole* » : conférencier invité, Subir Sachdev, le 17 mai 2022;
- « Modèles t-J désordonnés : criticalité, dissipation planckienne » : cours 4, le 24 mai 2022;
- « *Schwarzian theory of SYK fluctuations and T-linear resistivity* » : conférencier invité, Subir Sachdev, le 24 mai 2022;
- « Modèles t-J désordonnés : criticalité, dissipation planckienne (suite) » : cours 4, le 31 mai 2022;
- « *Fermi surface coupled to gauge fields (I)* » : conférencier invité, Subir Sachdev, le 31 mai 2022;
- « Modèles t-J désordonnés : criticalité, dissipation planckienne (suite) » : cours 5, le 31 mai 2022;
- « Perspectives et applications physiques », cours 6, le 7 juin 2022;
- « *Fermi surface coupled to gauge fields (II)* » : conférencier invité, Subir Sachdev, le 7 juin 2022.

COLLOQUE - *STRANGE METALS, SYK MODELS AND BEYOND*

Ce cycle de cours a été complété par un colloque international « *Strange metals, SYK models and beyond* » organisé conjointement avec le Pr Subir Sachdev qui a eu lieu les 2 et 3 juin 2022. Voici le programme des exposés invités :

- Pengfei Zhang (Caltech) : « Information scrambling at late time »;
- Laura Foini (IPhT, CEA Saclay) : « Quantum bounds and fluctuation-dissipation relations »;
- Koenraad Schalm (institut Lorentz, Leyde) : « Scrambling: Strong/weak, micro/macro, early/late »;

- Marco Schiro (Collège de France) : « Dynamics, chaos and energy transport through a strange quantum bath »;
- Nigel Hussey (université de Radboud, Nimègue) : « Compartmentalizing the cuprate strange metal »;
- Catherine Pépin (IPhT, CEA Saclay) : « Charge order and strange metal in cuprate superconductors »;
- Lucile Savary (ENS Lyon) : « Phonon thermal Hall conductivity from scattering with collective fluctuations »;
- Evyatar Tulipman (institut Weizmann) : « Strongly coupled phonon fluid and Goldstone modes in an anharmonic quantum solid: Transport and chaos »;
- Gaël Grissonnanche (université de Cornell) : « Planckian dissipation in a cuprate strange metal: Scattering rate, thermoelectric response and field dependence »;
- Dirk van der Marel (université de Genève) : « Scaling properties of the optical conductivity of quantum critical cuprates »;
- Olivier Parcollet (Flatiron Institute, New York/ IPhT, CEA Saclay) : « Planckian metal at a doping-induced quantum critical point »;
- Jörg Schmalian (Karlsruhe Institut für Technologie) : « SYK superconductors and their holographic duals »;
- Silke Paschen (université technique de Vienne) : « Strange metal behavior in heavy fermion compounds »;
- Julian Sonner (université de Genève) : « SYK: From quantum ergodicity to quantum gravity »;
- Blaise Goutéraux (CPHT, École polytechnique) : « Charge transport in gapless, pinned charge density waves ».

RECHERCHE

MATIÈRE QUANTIQUE À FORTES CORRÉLATIONS

Les recherches menées dans l'équipe concernent les systèmes constitués d'un très grand nombre de particules (les électrons d'un solide ou les atomes d'un gaz ultra-froid par exemple) ayant entre elles de fortes interactions. Pour ces systèmes, une description théorique en termes de fonctions d'ondes indépendantes est insuffisante. Le développement de nouvelles méthodes théoriques, analytiques et computationnelles, pour comprendre ces systèmes est au cœur de nos activités. En 2021-2022, ces développements ont porté en particulier sur le développement des méthodes de Monte Carlo diagrammatiques (Michel Ferrero et Fedor Šimkovic) et l'intégration des

méthodes de champ moyen dynamique (DMFT) dans les calculs de structure électronique. Nous nous sommes également intéressés aux algorithmes de type « Machine learning » (postdoctorat de Sidhartha Dash; collaboration avec Javier Robledo-Moreno *et al.*) : construction de fonctions d'ondes neuronales fermioniques en utilisant des « fermions cachés ». Notre équipe participe au développement de la librairie de codes *open-source* TRIQS¹ (*Toolbox for research on interacting quantum systems*). La rencontre annuelle des développeurs de cette librairie a été organisée au Collège de France, dans le cadre de la chaire, du 28 au 30 juin 2022.

Nous appliquons ces méthodes à des modèles comme le modèle de Hubbard bidimensionnel ou le modèle de Sachdev-Ye-Kitaev (Dumitrescu *et al.*, 2022; rédaction d'un article de revue sur ce sujet pour *Reviews of Modern Physics*) et à des questions de physique des matériaux. Les applications à la physique des matériaux quantiques ont concerné principalement en 2021-2022 les oxydes de métaux de transition et leurs hétérostructures (en particulier les ruthénates tels Sr_2RuO_4 ou encore SrMoO_3), les composés de terres rares et les composés magnétiques à ordre multipolaire (L. Pourovskii) et les nouveaux matériaux bidimensionnels « twistés » comme les dichalcogénures de métaux de transition.

INFORMATIONS SUR L'ÉQUIPE DE RECHERCHE

L'équipe de recherche « Matière quantique à fortes corrélations » est implantée au sein de l'Institut de physique du Collège de France (bâtiment E). L'équipe est rattachée au Centre de physique théorique – CPHT (CNRS UMR 7644), École polytechnique, IP-Paris.

Membres de l'équipe de chaire (2021-2022) : Silke Biermann, Michel Ferrero, Antoine Georges, Leonid Pourovskii; Sidhartha Dash (postdoctorant Collège de France), Fedor Šimkovic (postdoctorant CPHT); Renaud Garioud (doctorant), Liam Rampon (doctorant). Membres associés à l'équipe de chaire : Indranil Paul (LMPQ, université Paris-Diderot), Luca de' Medici (ESPCI). L'équipe est partenaire de nombreuses collaborations internationales, en particulier avec le Center for Computational Quantum Physics (Flatiron Institute, Foundation Simons, New York) et le département de physique de la matière quantique (université de Genève).

1. Voir : <https://triqs.github.io/triqs/latest/>.

PUBLICATIONS

- Chronister A., Zingl M., Pustogow A., Luo Y., Sokolov D.A., Jerzembeck F., Kikugawa N., Hicks C.W., Mravlje J., Bauer E.D., Thompson J.D., Mackenzie A.P., Georges A. et Brown S.E., « Tuning the Fermi liquid crossover in Sr_2RuO_4 with uniaxial stress », *npj Quantum Materials*, vol. 7, n° 1, 2022, art. 113, <https://doi.org/10.1038/s41535-022-00519-6>.
- Zang J., Wang J., Georges A., Cano J. et Millis A.J., « Real space representation of topological system: Twisted bilayer graphene as an example », <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.11573>.
- Wietek A., Wang J., Zang J., Cano J., Georges A. et Millis A., « Tunable stripe order and weak superconductivity in the Moiré Hubbard model », *Physical Review Research*, vol. 4, n° 4, 2022, art. 043048, <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.043048>.
- Golež D., Dufresne S.K.Y., Kim M.-J., Boschini F., Chu H., Murakami Y., Levy G., Mills A.K., Zhdanovich S., Isobe M., Takagi H., Kaiser S., Werner P., Jones D.J., Georges A., Damascelli A. et Millis A.J., « Unveiling the underlying interactions in Ta_2NiSe_5 from photoinduced lifetime change », *Physical Review B*, vol. 106, n° 12, 2022, art. L121106, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.L121106>.
- Robledo Moreno J., Carleo G., Georges A. et Stokes J., « Fermionic wave functions from neural-network constrained hidden states », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 119, n° 32, 2022, art. e2122059119, <https://doi.org/10.1073/pnas.2122059119>.
- Vitalone R.A., Sternbach A.J., Foutty B.A., McLeod A.S., Sow C., Golež D., Nakamura F., Maeno Y., Pasupathy A.N., Georges A., Millis A.J. et Basov D.N., « Nanoscale femtosecond dynamics of mott insulator $(\text{Ca}_{0.99}\text{Sr}_{0.01})_2\text{RuO}_4$ », *Nano letters*, vol. 22, n° 14, 2022, p. 5689-5697, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c00581>.
- Cappelli E., Hampel A., Chikina A., Bonini Guedes E., Gatti G., Hunter A., Issing J., Biskup N., Varela M., Dreyer C.E., Tamai A., Georges A., Bruno F.Y., Radovic M. et Baumberger F., « Electronic structure of the highly conductive perovskite oxide SrMoO_3 », *Physical Review Materials*, vol. 6, n° 7, 2022, art. 075002, <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.075002>.
- Chowdhury D., Georges A., Parcollet O. et Sachdev S., « Sachdev-Ye-Kitaev models and beyond: window into non-Fermi liquids », *Reviews of Modern Physics*, vol. 94, n° 3, 2022, art. 035004, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.94.035004>.
- Dumitrescu P.T., Wentzell N., Georges A. et Parcollet O., « Planckian metal at a doping-induced quantum critical point », *Physical Review B*, vol. 105, n° 18, 2022, art. L180404, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.L180404>.
- Käser S., Strand H.U.R., Wentzell N., Georges A., Parcollet O. et Hansmann P., « Interorbital singlet pairing in Sr_2RuO_4 : a Hund's superconductor », *Physical Review B*, vol. 105, n° 15, 2022, art. 155101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.155101>.
- Beck S., Hampel A., Parcollet O., Ederer C. et Georges A., « Charge self-consistent electronic structure calculations with dynamical mean-field theory using Quantum ESPRESSO, WANNIER 90 and TRIQS », *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 34, n° 23, 2022, art. 235601, <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac5d1c>.
- Zang J., Wang J., Cano J., Georges A. et Millis A.J., « Dynamical mean-field theory of moiré bilayer transition metal dichalcogenides: phase diagram, resistivity, and quantum criticality », *Physical Review X*, vol. 12, n° 2, 2022, art. 021064, <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.12.021064>.
- Nelson J.N., Nelson J.N., Schreiber N.J., Georgescu A.B., Goodge B.H., Faeth B.D., Parzyck C.T., Zeledon C., Kourkoutis L.F., Millis A.J., Georges A., Schloss D.G. et

- Shen K.M., « Interfacial charge transfer and persistent metallicity of ultrathin $\text{SrIrO}_3/\text{SrRuO}_3$ heterostructures », *Science Advances*, vol. 8, n° 5, 2022, art. eabj0481, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj0481>.
- Gourgout A., Grissonnanche G., Laliberté F., Ataei A., Chen L., Verret S., Zhou J.-S., Mravlje J., Georges A., Doiron-Leyraud N. et Taillefer L., « Seebeck coefficient in a cuprate superconductor: particle-hole asymmetry in the strange metal phase and Fermi surface transformation in the pseudogap phase », *Physical Review X*, vol. 12, n° 1, 2022, art. 011037, <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.12.011037>.
- Šimkovic F., Rossi R. et Ferrero M., « Two-dimensional Hubbard model at finite temperature: Weak, strong, and long correlation regimes », *Physical Review Research*, vol. 4, n° 4, 2022, art. 043201, <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.043201>.
- Šimkovic F. et Ferrero M., « Fast principal minor algorithms for diagrammatic Monte Carlo », *Physical Review B*, vol. 105, n° 12, 2022, art. 125104, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.125104>.
- Boust J., Aubert A., Fayyazi B., Skokov K.P., Skourski Y., Gutfleisch O. et Pourovskii L.V., « Ce and Dy substitutions in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$: site-specific magnetic anisotropy from first principles », *Physical Review Materials*, vol. 6, n° 8, 2022, art. 084410, <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.084410>.
- Fiore Mosca D., Pourovskii L.V. et Franchini C., « Modeling magnetic multipolar phases in density functional theory », *Physical Review B*, vol. 106, n° 3, 2022, art. 035127, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.035127>.
- Galler A. et Pourovskii L.V., « Electronic structure of rare-earth mononitrides: quasiamagnetic excitations and semiconducting bands », *New Journal of Physics*, vol. 24, n° 4, 2022, art. 043039, <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac6317>.
- Bernáth B., Kutko K., Wiedmann S., Young O., Engelkamp H., Christianen P.C.M., Poperezhai S., Pourovskii L.V., Khmelevskyi S., et Kamenskyi D., « Massive magnetostriction of the paramagnetic insulator $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$ via a single-ion effect », *Advanced Electronic Materials*, vol. 8, n° 3, 2022, art. 2100770, <https://doi.org/10.1002/aelm.202100770>.
- Boust J., Galler A., Biermann S. et Pourovskii L.V., « Combining semilocal exchange with dynamical mean-field theory: electronic structure and optical response of rare-earth sesquioxides », *Physical Review B*, vol. 105, n° 8, 2022, art. 085133, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.085133>.
- al Badri M.A., Linscott E., Georges A., Cole D.J., et Weber C., « Superexchange mechanism and quantum many body excitations in the archetypal di-Cu oxo-bridge », *Communications Physics*, vol. 3, n° 4, 2021, <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00964-6> [arXiv : 2112.14254].