

Annuaire du Collège de France

121^e année

2020
2021

Résumé des cours et travaux



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Annuaire du Collège de France

Cours et travaux du Collège de France

121 | 2024
2020-2021

Physique de la matière condensée

Antoine Georges



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/annuaire-cdf/19263>

DOI : 10.4000/12ktp

ISBN : 978-2-7226-0778-1

ISSN : 2109-9227

Éditeur

Collège de France

Édition imprimée

Date de publication : 18 novembre 2024

Pagination : 111-116

ISBN : 978-2-7226-0777-4

ISSN : 0069-5580

Ce document vous est fourni par Collège de France



Référence électronique

Antoine Georges, « Physique de la matière condensée », *L'annuaire du Collège de France* [En ligne], 121 | 2024, mis en ligne le 01 octobre 2024, consulté le 28 novembre 2024. URL : <http://journals.openedition.org/annuaire-cdf/19263> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/12ktp>

Le texte et les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés), sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

Antoine Georges

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

La série de cours « Le modèle de Hubbard fermionique : introduction et progrès récents » est disponible, en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/agenda/cours/le-modele-de-hubbard-fermionique-introduction-et-progres-recents>), ainsi que le séminaire du même nom (<https://www.college-de-france.fr/agenda/seminaire/le-modele-de-hubbard-introduction-et-progres-recents>).

ENSEIGNEMENT

COURS – LE MODÈLE DE HUBBARD FERMIONIQUE : INTRODUCTION ET PROGRÈS RÉCENTS

Le cycle de cours et séminaires de cette année avait pour titre : « Le modèle de Hubbard fermionique : introduction et progrès récents ». Paradigme de la physique des systèmes quantiques en interaction, le modèle de Hubbard a , dans ce domaine, un statut similaire à celui du modèle d'Ising en physique statistique. C'est le modèle le plus simple à formuler, mais dont on peut espérer qu'il suffise à comprendre au moins qualitativement certains phénomènes collectifs comme le magnétisme, les transitions métal-isolant ou la supraconductivité non conventionnelle. Malgré sa simplicité, ce modèle constitue un formidable défi théorique. Après une introduction aux motivations physiques – depuis les matériaux à fortes corrélations électroniques jusqu'aux atomes froids dans les réseaux optiques –, le cours de cette année a fait

point sur l'état actuel de notre compréhension de ce modèle, particulièrement en deux dimensions, et a présenté les principales méthodes ayant permis des progrès récents ou laissant espérer des avancées prochaines.

Les cours ont successivement porté sur : une introduction au modèle de Hubbard, ses symétries et les diverses réalisations physiques ; les diagonalisations exactes de systèmes de petite taille ; la théorie de champ moyen (statique) et la RPA ; les fluctuations de spin et la théorie de Vilk-Tremblay du *pseudogap* en couplage faible ; le *pseudogap* en couplage fort et les approches de champ moyen dynamique étendues aux amas (CDMFT, DCA) et les algorithmes de Monte Carlo diagrammatique.

SÉMINAIRES LIÉS

Le cours a été complété par les séminaires suivants :

Séminaire 1 – *Dynamical mean-field theory in statistical physics: Glassy dynamics, ecosystems and interdisciplinary applications*

Giulio Biroli (École normale supérieure), le 4 mai 2021.

Séminaire 2 – *The one-dimensional Hubbard model, from theory to experiments*

Le 11 mai 2021, Thierry Giamarchi (université de Genève).

Séminaire 3 – *The Hubbard model from a diagrammatic Monte Carlo perspective*

Fedor Šimkovic (CPHT de l'École polytechnique/Collège de France), le 18 mai 2021.

Séminaire 4 – *How to read between the lines of electronic spectra: The diagnostics of fluctuations in strongly correlated electron systems*

Thomas Schäfer (institut Max-Planck de recherche sur l'état solide, Stuttgart), le 25 mai 2021.

Séminaire 5 – *Introduction and perspective on tensor network methods for quantum many-body physics*

Miles Stoudenmire (CCQ de Flatiron Institute, Simons Foundation, New York), le 3 juin 2021.

Séminaire 6 – *Stripes, antiferromagnetism and the pseudogap in the doped hubbard model from minimally entangled typical thermal states*

Alexander Wietek (CCQ de Flatiron Institute, Simons Foundation, New York), le 3 juin 2021.

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 2020-2021, ces développements ont porté en particulier sur le développement des méthodes de Monte Carlo diagrammatiques (M. Ferrero et F. Šimkovic). Nous nous sommes également intéressés aux algorithmes de type « Machine learning » (J. Robledo-Moreno *et al.*, 2021). Notre équipe participe au développement de la librairie de codes *open-source* *TRIQS*¹ : *Toolbox for research on interacting quantum systems*.

Nous appliquons ces méthodes à des modèles comme le modèle de Hubbard ou le modèle de Sachdev-Ye-Kitaev (Shackleton *et al.*, 2021) et à des questions de physique des matériaux. Notre activité en 2020-2021 a en particulier été marquée par un effort important visant à étudier le modèle de Hubbard bidimensionnel en combinant tout un ensemble de méthodes numériques, ceci avec deux finalités : obtenir, d'une part, une compréhension plus complète des effets physiques en jeu et, d'autre part, de proposer une comparaison de ces différentes méthodes numériques de manière à établir des résultats contrôlés. Deux études d'envergure réunissant de nombreux auteurs dans le cadre d'une collaboration internationale ont ainsi été publiées dans *Physical Review X* : l'une sur le modèle de Hubbard sur réseau carré en couplage faible (Schäfer *et al.*, 2021), et l'autre sur les transitions de phase du modèle de Hubbard sur réseau triangulaire au demi-remplissage (Wietek *et al.*, 2021). Les applications à la physique des matériaux quantiques ont concerné principalement les oxydes de métaux de transition et leurs hétérostructures et les nouveaux matériaux bidimensionnels « twistés » (Kennes *et al.*, 2021).

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 (2020-2021) : Steffen Backes, Silke Biermann, Michel Ferrero, Antoine Georges, Leonid Pourovskii, Alaska Subedi (permanents

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

CPHT); Hanhim Kang, Giacomo Mazza, Thomas Schäfer, Fedor Šimkovic (postdoctorants CPHT); Renaud Garioud (doctorant). Membres associés à l'équipe de chaire : Indranil Paul (LMPQ, université Paris-Diderot), Luca de' Medici (ESPCI).

PUBLICATIONS

Ardizzone I., Zingl M., Teyssier J., Strand H.U.R., Peil O., Fowlie J., Georgescu A.B., Catalano S., Bachar N., Kuzmenko A.B., Gibert M., Triscone J.-M., Georges A. et van der Marel D., « Optical properties of LaNiO_3 films tuned from compressive to tensile strain », *Physical Review B*, vol. 102, n° 15, 2020, art. 155148, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.155148>.

Benhabib S., Lupien C., Paul I., Berges L., Dion M., Nardone M., Zitouni A., Mao Z.Q., Maeno Y., Georges A., Taillefer L. et Proust C., « Ultrasound evidence for a two-component superconducting order parameter in Sr_2RuO_4 », *Nature Physics*, vol. 17, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41567-020-1033-3>.

Golež D., Sun Z., Murakami Y., Georges A. et Millis A.J., « Nonlinear spectroscopy of collective modes in excitonic insulator », *Physical Review Letters*, vol. 125, n° 25, 2020, art. 257601, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.257601>.

Rossi R., Šimkovic F. et Ferrero M., « Renormalized perturbation theory at large expansion orders », *Europhysics Letters*, vol. 132, n° 1, 2020, art. 11001, <https://doi.org/10.1209/0295-5075/132/11001>.

Šimkovic F., Rossi R. et Ferrero M., « Efficient one-loop-renormalized vertex expansions with connected determinant diagrammatic Monte Carlo », *Physical Review B*, vol. 102, n° 19, 2020, art. 195122, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.195122>.

Ahn C., Cavalleri A., Georges A., Ismail-Beigi S., Millis A.J. et Triscone J.-M., « Designing and controlling the properties of transition metal oxide quantum materials », *Nature Materials*, vol. 20, 2021, p. 1462-1468, <https://doi.org/10.1038/s41563-021-00989-2>.

Golež D., Sun Z., Murakami Y., Georges A. et Millis A.J., « Nonlinear spectroscopy of collective modes in excitonic insulator », *Physical Review Letters*, vol. 125, 2020, art. 257601, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.257601>.

Schäfer T., Wentzell N., Šimkovic F., Yuan-Yao H., Hille C., Klett M., Eckhardt C.J., Arzhang B., Harkov V., Regent F.-M.L., Kirsch A., Wang Y., Kim A.J., Kozik E., Stepanov E.A., Kauch A., Andergassen S., Hansmann P., Rohe D., Vilk Y.M., LeBlanc J.P.F., Zhang S., Tremblay A.M.S., Ferrero M., Parcollet O. et Georges A., « Tracking the footprints of spin fluctuations: A multi-method, multi-messenger study of the two-dimensional hubbard model », *Physical Review X*, vol. 11, 2021, art. 011058, <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.011058>.

Shackleton H., Wietek A., Georges A. et Sachdev S., « Quantum phase transition at non-zero doping in a random t - J model », *Physical Review Letters*, vol. 126, 2021, art. 136602, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.136602>.

Wietek A., He Y.-Y., White S.R., Georges A. et Stoudenmire E.M., « Stripes, antiferromagnetism, and the pseudogap in the doped hubbard model at finite temperature », *Physical Review X*, vol. 11, 2021, art. 031007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.031007>.

Hampel A., Lee-Hand J., Georges A. et Dreyer C.E., « Correlation-induced octahedral rotations in SrMoO₃ », *Physical Review B*, vol. 104, 2021, art. 035102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.035102>.

Kennes D.M., Claassen M., Xian L., Georges A., Millis A.J., Hone J., Dean C.R., Basov D.N., Pasupathy A.N. et Rubio A., « Moiré heterostructures as a condensed- matter quantum simulator », *Nature Physics*, vol. 17, n° 2, 2021, p. 155-163, <https://doi.org/10.1038/s41567-020-01154-3>.

Kim M., Miao H., Choi S., Zingl M., Georges A. et Kotliar G., « Spatial locality of electronic correlations in LiFeAs », *Physical Review B*, vol. 103, 2021, art. 155107, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.155107>.

Lunts P., Georges A., Miles Stoudenmire E. et Fishman M., « The Hubbard model on the Bethe lattice via variational uniform tree states: Metal insulator transition and a Fermi », *Physical Review Research*, vol. 3, art. 023054, 2021, <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.023054> [arXiv : 2010.06543].

Moreno J.R., Flick J. et Georges A., « Machine learning band gaps from the electron density », *Physical Review Materials*, vol. 5, 2021, art. 083802, 2021, <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.083802>.

