



## Foreword / Avant-propos

## Condensed matter physics in the 21st century: The legacy of Jacques Friedel



The purpose of this dossier of *Comptes rendus Physique* devoted to the memory of Jacques Friedel is to give a panorama of his exceptional and numerous contributions to modern condensed matter physics. Since it is not possible to cover all the domains he investigated in a single volume, we have selected only a limited number of topics. We have tried, when possible, to present a juxtaposition of articles written by his former students or colleagues with others written instead by younger researchers whose work is inspired by important concepts originating from the work of Jacques Friedel, but who may have never met him.

The first contact of Jacques Friedel with condensed matter physics was the experimental work he performed as a student on disordered aluminium alloys during the late 1940s, trying to understand the influence of defects on their metallurgical properties. Even though he very quickly became a theorist and gave up experiments, it is clear that this first work strongly inspired his constant interest in dislocations, which play an essential role in the mechanical properties of metals and more generally all ductile materials, depending on their crystalline order. The article of Yves Bréchet is a review of the vast impact of Friedel in the multidisciplinary science of metallurgy, whereas the articles of Sébastien Balibar and Paweł Pieranski illustrate in two very different systems, solid helium and liquid crystals, the depth and the power of concepts initially developed by Jacques Friedel for the understanding of dislocations in metals.

Most of the papers in this dossier are devoted to the electronic and magnetic properties of metals. Jacques Villain, Patrick Bruno and Mireille Lavagna give a pedagogical introduction for students and non-specialists to the main concepts developed by Jacques Friedel, who basically pioneered the field. He realised the importance of defects in the electronic and magnetic properties of metals as he was a PhD student working in the group of Prof. Nevill Mott. It is already at that time that he discovered that conduction electrons in metals give rise to long-range charge oscillations around an impurity with a periodicity equal to the Fermi wavelength. These now famous “Friedel oscillations” were discovered experimentally a few years later. His first student Émile Daniel narrates how they provided the explanation of mysterious experimental data in Nuclear Magnetic Resonance experiments in which they were revealed. In contrast, the very recent experimental results presented by Pierre Mallet and Jean-Yves Veuillet take advantage of the scanning tunnelling microscope to visualize these oscillations on graphene and the specific signatures of its multi-valley energy band structure. The article by Cristina Bena presents a modern, theoretical approach that is mainly applied to graphene too.

In the physics of metals, quasi-1D organic conductors play a very special role due to the emergence of structural and electronic instabilities that lead to a variety of new phases, including superconductivity, charge, and spin-density wave ordering, which have been explored with success in the theoretical and experimental groups around Jacques Friedel since the beginning of the 1980s.

Thierry Giamarchi recalls the specific properties of electron interactions in one-dimensional conductors and describes the current theoretical problems. Jean-Paul Pouget reviews the experimental work in charge-density wave and spin-density wave systems, and discusses the conditions of observation of Kohn anomalies (i.e. phonon anomalies due to conduction electrons). Denis Jérôme, with Shingo Yonezawa, reports on superconducting properties and, with Gilles Montambaux, on high-magnetic-field quantum oscillations in quasi-one-dimensional organic conductors (synthesised by Bechgaard). Jean-Pierre Gaspard suggests extending the concept of Peierls transition to a large class of three-dimensional materials, thus introducing a novel description of covalent bonds.

The four following articles are devoted to magnetism. In the spirit of the preference of Jacques Friedel for simplified physical models over exact numerical simulations, Cyrille Barreteau, Daniel Spanjaard, and Marie-Catherine Desjonquères present an extension of the tight-binding approximation, which allows them to investigate magnetic alloys by analytic methods. The following two papers, one by Antoine Georges and the other by Peter Levy and Albert Fert, illustrate the concept of virtual bound state introduced by Jacques Friedel. The model he proposed describes the occupation and the magnetic moment of an impurity state coupled with conduction electrons, in relation with the phase shift of a plane wave scattered by the impurity. This work paved the way to the understanding of the Kondo screening of the magnetic moment

of an impurity in a metal and the calculation of the magnetic coupling between magnetic impurities. The papers presented here give examples of the variety of problems inspired by these ideas, from the Kondo effect in quantum dots to heavy fermions, spintronics and skyrmions in ferromagnetic systems. The reader will also appreciate the epistemological views expressed in these papers, especially the one by Georges.

More indirectly, the pioneering work of André Blandin and Jacques Friedel on disordered magnetic impurities in a metallic matrix also inspired the concept of frustration at the heart of the physics of spin glasses. Philippe Mendels and Fabrice Bert show how the combination of geometrical frustration and the quantum character of the magnetic moments in Kagome lattices give rise to an original spin liquid state at very low temperature.

Jacques Friedel was also interested in surface physics and nanostructures long before they were fashionable, as is illustrated by the contributions of Jacek Goniakowski and Claudine Noguera (his last PhD student) on oxide surfaces, Martin Schmidt and Catherine Bréchignac on aggregates and Thomas Pardo on mechanical properties of nanoscopic objects.

Of course, there is plenty more that is not described in this volume; these 20 papers are clearly not enough to tell the whole saga. This is why we have added a list of references [1–6] to review articles and books clearly inspired by Friedel's style. Every condensed matter physicist or chemist, whether he knows it or not, has somewhere in him a part of this legacy that he shares with his/her colleagues.

## Physique de la matière condensée au XXI<sup>e</sup> siècle : l'héritage de Jacques Friedel

Ce dossier des *Comptes rendus Physique* est dédié à la mémoire de Jacques Friedel. Son objectif est de dresser un panorama des nombreuses contributions exceptionnelles de celui-ci à la physique moderne de la matière condensée. Dans la mesure où il n'était pas possible de couvrir tous les domaines auxquels il a contribué, nous avons été amenés à sélectionner seulement un nombre limité de sujets. Nous avons essayé, quand cela a été possible, de juxtaposer des papiers écrits par ses anciens étudiants ou collègues à d'autres écrits, au contraire, par des chercheurs plus jeunes, dont le travail a été inspiré par des concepts importants trouvant leurs origines dans les travaux de Jacques Friedel, mais qui parfois ne l'ont jamais connu.

C'est dans les années 1940, alors qu'il était encore étudiant, que Jacques Friedel est entré dans le monde de la physique de la matière condensée en réalisant des expériences sur des alliages désordonnés à base d'aluminium à l'École des mines de Nancy. Il essayait de comprendre l'influence des défauts sur les propriétés métallurgiques de ces alliages. Bien qu'il soit vite devenu théoricien et qu'il ait rapidement abandonné les expériences, il est clair que ces premiers travaux ont fortement inspiré son intérêt constant pour les dislocations, qui jouent un rôle essentiel dans les propriétés mécaniques des métaux et plus généralement des matériaux à forte plasticité, en relation avec leur structure cristalline.

L'article d'Yves Bréchet constitue une revue de l'impact fondamental de Friedel dans cette science pluridisciplinaire qu'est la métallurgie, alors que les articles de Sébastien Balibar et de Paweł Pieranski illustrent, dans des systèmes très différents, l'hélium 4 solide et les cristaux liquides, la profondeur et l'importance des concepts qu'il a développés pour la compréhension des dislocations dans les métaux.

La plupart des autres papiers de ce dossier sont consacrés aux propriétés électroniques et magnétiques des métaux. Jacques Villain, Patrick Bruno et Mireille Lavagna commencent par présenter une revue pédagogique, destinée aux non-spécialistes, des principaux concepts introduits par Jacques Friedel, qui a en quelque sorte créé ce domaine. Il a été l'un des premiers à réaliser l'importance des défauts dans les propriétés électroniques et magnétiques des métaux pendant son travail de thèse dans le groupe du Pr. Nevill Mott. C'est à cette époque qu'il a découvert que les impuretés dans les métaux donnent lieu à des oscillations de charge à longue portée avec une période égale à la longueur d'onde de Fermi. Ces maintenant célèbres oscillations de Friedel ont été découvertes expérimentalement quelques années plus tard. Son premier étudiant Émile Daniel raconte comment des résultats mystérieux d'expériences de résonance magnétique nucléaire ont pu être expliqués par ces oscillations. Beaucoup plus récents, les travaux de microscopie à effet tunnel décrits par Pierre Mallet et Jean-Yves Veuillen ont permis de visualiser directement ces oscillations de Friedel dans le graphène avec la signature de la structure de bande à plusieurs vallées de ce matériau. L'article de Cristina Bena présente une description théorique moderne de ces oscillations de Friedel, essentiellement en relation aussi avec le graphène.

Dans la physique des métaux, les conducteurs organiques quasi unidimensionnels jouent un rôle tout particulier, lié à la présence d'instabilités结构和électronics donnant lieu à une variété importante de nouvelles phases à basse température, éventuellement supraconductrices ou au contraire isolantes, avec un ordre de type ondes de densité de charge ou de spin. Cette physique a été explorée avec beaucoup de succès à Orsay par les groupes expérimentateurs et théoriciens gravitant autour de Friedel à partir des années 1980. Thierry Giamarchi expose les concepts théoriques spécifiques aux interactions électroniques dans les conducteurs unidimensionnels et décrit les problèmes actuels. Jean-Paul Pouget dresse un panorama des travaux expérimentaux sur les systèmes présentant des ondes de densité de charge ou de spin et discute l'observabilité des anomalies de Kohn dans le spectre des phonons liées aux électrons de conduction. Denis Jérôme, avec Shingo Yonezawa, décrit les propriétés supraconductrices et, avec Gilles Montambaux, la physique des oscillations quantiques en champ magnétique, des conducteurs organiques quasi unidimensionnels (synthétisés par Bechgaard). Jean-Pierre Gaspard suggère d'étendre le concept de transition de Peierls aux matériaux tridimensionnels en introduisant une description théorique originale des liaisons covalentes.

Les quatre articles suivants sont consacrés au magnétisme dans les métaux. Fidèles à l'esprit de Jacques Friedel, préférant donc les modèles simples aux simulations numériques exactes, Cyrille Barreteau, Daniel Spanjaard et Marie-Catherine Desjonquères présentent une extension de l'approximation des liaisons fortes leur permettant d'étudier les alliages magnétiques de façon analytique. L'article suivant, par Antoine Georges, ainsi que celui de Peter Levy et Albert Fert, illustrent le concept de niveau lié virtuel introduit par Jacques Friedel pour décrire l'occupation et le moment magnétique d'un état d'impureté couplé aux électrons de conduction d'un métal en relation avec le déphasage des ondes planes diffusées par l'impureté. Ce travail a posé les jalons de la compréhension de l'écrantage Kondo du moment magnétique d'une impureté dans un métal et du calcul du couplage magnétique entre plusieurs impuretés via les électrons de conduction. Les articles présentés ici montrent la variété des problèmes inspirés par ces idées, de l'effet Kondo dans les boîtes quantiques et des fermions lourds à la spintronique et aux skyrmions dans les ferromagnétiques. Le lecteur appréciera aussi la vision épistémologique de ces deux articles, en particulier celui d'Antoine Georges.

De façon plus indirecte, les travaux pionniers de Jacques Friedel et d'André Blandin sur les impuretés diluées dans une matrice métallique ont amené le concept de frustration au cœur de la physique des verres de spin. Philippe Mendels et Fabrice Bert montrent comment la combinaison de cette frustration géométrique et du caractère quantique des moments magnétiques dans un réseau de Kagomé donne lieu, à basse température, à un état original dit « liquide de spin ».

Jacques Friedel s'est aussi intéressé à la physique des surfaces et des nanostructures bien avant qu'elles soient à la mode, comme l'illustrent les contributions de Jacek Goniakowski et Claudine Noguera (sa dernière étudiante) sur les surfaces d'oxyde, de Martin Schmidt et Catherine Bréchignac sur les agrégats ainsi que de Thomas Pardoën sur les propriétés mécaniques des objets nanométriques.

Bien sûr, il y aurait encore bien plus de sujets à couvrir, car ces 19 papiers ne peuvent pas raconter toute l'histoire. C'est pour cela que nous avons inclus dans cette préface une liste [1–6] de références et de livres inspirés par le style Friedel. Tout physicien ou chimiste de la matière condensée porte en lui une partie de cet héritage friedélien qu'il partage avec ses collègues.

## References

- [1] Review articles dedicated to the 90th anniversary of J. Friedel: *J. Supercond. Nov. Magn.* **25** (2012).
- [2] M. Héritier, *Physique de la matière condensée : des atomes froids aux supraconducteurs à haute température critique*, Collection QuinteSciences, EDP Sciences, Paris, 2013.
- [3] Y. Bréchet, O. Hardouin Duparc, *Matér. Tech.* **102** (6) (2014).
- [4] H. Alloul, *Physique des électrons dans les solides*, Éditions de l'École polytechnique, Palaiseau, France, 2012.
- [5] L. Lévy, *Magnétisme et supraconductivité*, EDP Sciences–CNRS Éditions, 1997.
- [6] M.-C. Desjonquères, D. Spanjaard, *Concepts in Surface Physics*, Springer, 1993.

Hélène Bouchiat, Jacques Villain

Available online 22 December 2015