



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Physique

Jacques Villain

Foreword: Prizes of the French Academy of Sciences 2020

Volume 22, Special Issue S5 (2021), p. 1-5

Published online: 11 May 2022

Issue date: 11 May 2022

<https://doi.org/10.5802/crphys.107>

Part of Special Issue: Prizes of the French Academy of Sciences 2020



This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Les Comptes Rendus. Physique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte
www.centre-mersenne.org
e-ISSN : 1878-1535



Foreword: Prizes of the French Academy of Sciences 2020

Avant-propos : Prix 2020 de l'Académie des sciences

Jacques Villain*, ^a

^a Institut Laue-Langevin, 71 Avenue des Martyrs, CS 20156, 38042 Grenoble cedex 9, France

E-mail: jvillain@infonie.fr

This special issue of *Comptes Rendus Physique* brings together articles by three winners of prizes awarded by the Academy of Sciences in 2020. The goal of this foreword is to make them more accessible by non experts, especially students.

The first article, by Philippe Bourges (“Science et innovation” CEA prize), Dalila Bounoua and Yvan Sidis, is part of the history of superconductivity, fertile in unexpected twists for 110 years. It was in 1911 that the Dutch scientist Kamerlingh Onnes, having succeeded in achieving very low temperatures which allowed him to liquefy helium, had the very natural curiosity to study the properties of various elements at these temperatures. He was surprised to find that some of them had zero electrical resistance. An electric current could thus circulate for days in a ring of mercury. What was the explanation for this perpetual motion? It was not found until 46 years later by Bardeen, Cooper and Schrieffer, in 1957. These three scientists showed that electrons can form pairs (Cooper pairs). In a simplified description, we can say that these pairs are bosons and that at very low temperatures these bosons undergo Bose condensation, which leads to superconductivity. It is obvious that a vanishing electric resistance has a considerable technological interest, but this interest was considerably reduced by the need for very low temperatures. The critical temperature of the elements culminates at about ten kelvins in niobium and can reach higher values in compounds, but it was not expected to exceed the 23 K which correspond to Nb₃Ge. However, in 1986 in Zürich, Müller and Bednorz discovered a family of superconductors whose critical temperature was higher, and a little later exceeded the temperature of liquid nitrogen (77 K). These materials were oxides containing copper and other metals. A stoichiometric oxide is an insulator, but if stoichiometry is violated, a conductor can be obtained, and even a superconductor (see figure 1 of the article by Bourges et al.). Unfortunately this type of superconductivity cannot be explained by the theory of Bardeen, Cooper and Schrieffer... nor by any theory currently accepted by all theoreticians. To fully understand the superconductivity of

* Corresponding author.

cuprates, one has to understand the transition to the non-superconducting state, and therefore to understand the non-superconducting state which appears above the critical temperature T_c . This state itself presents remarkable particularities below a temperature T^* . The phase which is stable between T_c and T^* is called pseudogap phase for reasons which will not be explained here. In particular, its Fermi surface is quite different from the Fermi surface at $T > T^*$ [1–3]. We would like to characterize the pseudo-gap phase by structural, e.g. electronic properties. This is precisely the subject of the article by Bourges et al. The authors think they have confirmed by polarized neutron diffraction a theory of Varma according to which certain electrons would describe closed trajectories (loops) by hopping from one atom to another. This is an unusual thing. We usually imagine conduction electrons moving in a straight line and localized electrons rotating around a nucleus. Varma's interatomic loops constitute magnetic moments as well as the intra-atomic loops, and these magnetic moments, according to the observations of the authors, are ordered in an antiferromagnetic structure. This magnetism in which spin plays no role is a great novelty. But there is still a lot to do, especially for theoreticians. The coincidence of the pseudo-gap with this novel magnetism is an experimental observation, but it remains to be determined if it has a deep physical reason.

The second article of this special issue, written by H el ene Montes and François Lequeux (prix de la fondation d'entreprise Michelin) is devoted to the materials that make up our tires, for example: elastomers reinforced by the inclusion of rigid particles intended to improve their mechanical qualities, in particular their resistance to wear. The authors begin by describing the properties of pure elastomer, which is a viscoelastic material, i.e. having both viscosity and elasticity. Its response to a time-dependent stress is described by the relaxation modulus $E(t)$ which, like the elastic modulus E (also called Young's modulus) and the shear modulus, is expressed in Pascals. The authors introduce a model, based on the discovery of dynamic heterogeneities in glasses at the scale of a few nanometers, which describes well the viscoelastic behavior of a homogeneous elastomer from the assumption of a domain structure. They then treat elastomers reinforced with rigid particles. They show that these particles are mechanically linked by two kinds of bonds: glassy bridges and rubber bridges; the glassy state and the rubber state of an elastomer differ by the value of the shear modulus, of the order of GPa in the first case and MPa in the second. The authors apply in particular their ideas to the Payne effect, a non-linear phenomenon which leads to high energy dissipation in reinforced elastomers.

The third article presented here is the work of Etienne Perret (Espoir-IMT prize)... It illustrates the growing presence of robots in our lives, a presence that would not be possible without the complicity of physicists. A century ago, when somebody went to the grocer to buy a jar of fresh cream and a pair of socks, the grocer had to calculate the price by adding up with a pencil and a sheet of paper, which required time and involved the risk of error. Half a century later, the grocer had acquired a machine that did the additions, a kind of very specialized robot, which unfortunately was unable to read, so that the grocer had to introduce the numbers to be added. The waste of time and the risk of error were less, but not zero. Today, when we go to the supermarket to buy ten items, it is sufficient to present the 10 barcodes to a robot reader which takes care of the reading and the additions. The barcode is just a label that carries simple information in a language that the robot can read more easily than Arabic numerals and the Latin alphabet. Also, if the supermarket decides to change the price, this can be done without changing the label. In this dialogue between a tag and a reading robot, the robot can be extremely sophisticated and receive orders from the other side of the world, but the tag must be as cheap as possible. Perret and his collaborators replace the optical reading of the bar code or the QR code (Quick Reading) by a reading by electromagnetic waves at radio frequency, which makes it possible, for example, to read information concealed by an opaque

envelope. This obviously involves replacing the barcode with a label of another kind. Such labels already exist. They use RFID technology [radio frequency identification], which equips contactless bus tickets, ski passes, building entry badges. These labels, which use electronic “chips”, have the drawback of being significantly more expensive than barcodes or QR codes. Perret and his collaborators offer cheap, radio-readable tags without chips. More details can be found in an interview with the author, on the website: [https://imtech.wp.imt.fr/2020/11/24/prix-imt-academie-des-sciences-etienne-perret/...](https://imtech.wp.imt.fr/2020/11/24/prix-imt-academie-des-sciences-etienne-perret/) and of course in the article of this special issue.

These three articles give an idea of the diversity of current research in physics.

I acknowledge the help of Antoine Georges, Marc-Henri Julien and Tim Ziman as well as that of the authors.

Avant-propos

Le présent numéro spécial des *Comptes Rendus Physique* rassemble des articles de trois lauréats de prix décernés par l'Académie des Sciences en 2020. L'avant-propos qui y suit tente de les rendre plus accessibles aux non spécialistes et notamment aux étudiants.

Le premier article, dû à Philippe Bourges (Prix « Science et innovation » du CEA), Dalila Bounoua et Yvan Sidis, s'inscrit dans l'histoire de la supraconductivité, fertile en rebondissements inattendus depuis 110 ans. C'est en effet en 1911 que le Néerlandais Kamerlingh Onnes, ayant réussi à réaliser de très basses températures qui lui permettaient de liquéfier l'hélium, eut la curiosité bien naturelle d'étudier les propriétés de divers éléments à ces températures. Il eut la surprise de constater que certains d'entre eux avaient une résistance électrique nulle. Un courant électrique pouvait ainsi circuler pendant des jours dans un anneau de mercure. Quelle était l'explication de ce mouvement perpétuel? Elle ne fut trouvée que 46 ans plus tard par Bardeen, Cooper et Schrieffer, en 1957. Ces trois chercheurs montrèrent que les électrons peuvent former des paires (paires de Cooper). Dans une description simplifiée, on peut dire que ces paires sont des bosons et qu'à très basse température ces bosons subissent la condensation de Bose, ce qui mène à la supraconductivité. Il est évident qu'une résistance électrique nulle a un intérêt technologique considérable, mais cet intérêt se trouvait considérablement diminué par la nécessité de températures très basses. La température critique des éléments culmine à une dizaine de kelvins dans le niobium et peut atteindre des valeurs plus élevées dans des composés, mais on ne pensait pas pouvoir dépasser les 23 K qui correspondent à Nb_3Ge . Or, en 1986 à Zürich, Müller et Bednorz découvrirent une famille de supraconducteurs dont la température critique était plus élevée et allait un peu plus tard dépasser la température de l'azote liquide (77 K). Il s'agissait d'oxydes contenant du cuivre et d'autres métaux. Un oxyde bien stœchiométrique est isolant, mais si on viole la stœchiométrie on peut obtenir un conducteur, et même un supraconducteur (voir la figure 1 de l'article de Bourges *et al.*). Malheureusement ce type de supraconductivité n'est pas explicable par la théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer... ni par aucune théorie admise par tous les théoriciens actuellement. Pour bien comprendre la supraconductivité, il faudrait comprendre la transition à l'état non supraconducteur, donc comprendre l'état non supraconducteur qui apparaît au-dessus de la température critique T_c . Or cet état lui-même présente, en dessous d'une certaine température T^* , des particularités remarquables, et c'est de cela que nous parlent Philippe Bourges et al. La phase stable entre T_c et T^* est traditionnellement appelée phase à pseudo-gap pour des raisons que nous n'exposerons pas. Elle se caractérise notamment par une surface de Fermi très différente de la surface de Fermi à $T > T^*$ [1–3]. On aimerait pouvoir caractériser la phase pseudo-gap par des propriétés structurelles (par exemple électroniques). Or

c'est précisément l'objet de l'article de Bourges *et al.* Les auteurs pensent avoir confirmé par diffraction de neutrons polarisés une théorie de Varma selon laquelle certains électrons sauteraient d'un atome à l'autre en décrivant des trajectoires fermées (boucles). C'est là une chose inhabituelle. On imagine d'ordinaire les électrons de conduction se déplaçant en ligne droite et les électrons localisés tournant autour d'un noyau. Les boucles interatomiques de Varma constituent des moments magnétiques aussi bien que les boucles intra-atomiques, et ces moments magnétiques, selon les observations des auteurs, s'ordonnent en une structure antiferromagnétique. Ce magnétisme dans lequel le spin ne joue aucun rôle est une grande nouveauté. La coïncidence du pseudo-gap avec ce magnétisme de nature nouvelle est une constatation expérimentale, mais il reste à déterminer si elle a une cause physique profonde.

Le deuxième article du présent numéro spécial, écrit par Hélène Montes et François Lequeux (prix de la fondation d'entreprise Michelin), est consacré aux matériaux qui constituent par exemple nos pneumatiques : des élastomères renforcés par l'inclusion de particules rigides destinées à améliorer leurs qualités mécaniques, notamment leur résistance à l'usure. Les auteurs commencent par décrire les propriétés de l'élastomère pur, qui est un matériau viscoélastique, c'est-à-dire pourvu à la fois de viscosité et d'élasticité. Sa réponse à une contrainte dépendant du temps est décrite par le module de relaxation $E(t)$ qui, comme le module élastique E (encore appelé module d'Young) et le module de cisaillement, s'exprime en Pascals. Les auteurs introduisent un modèle, basé sur la découverte des hétérogénéités dynamiques dans les verres à l'échelle de quelques nanomètres, qui décrit bien le comportement viscoélastique d'un élastomère homogène à partir de l'hypothèse d'une structure en domaines. Ils s'attaquent ensuite aux élastomères renforcés par des particules rigides. Ils montrent que ces particules sont reliées mécaniquement par deux sortes de liaisons : des ponts vitreux et des ponts caoutchouteux ; l'état vitreux et l'état caoutchouteux d'un élastomère diffèrent par la valeur du module de cisaillement, de l'ordre du GPa dans le premier cas et du MPa dans le second. Les auteurs appliquent notamment leurs idées à l'effet Payne, phénomène non linéaire qui entraîne une dissipation d'énergie élevée dans les élastomères renforcés.

Le troisième article présenté ici est l'œuvre d'Etienne Perret (prix Espoir-IMT). Il illustre la présence croissante des robots dans notre vie, présence qui ne serait pas possible sans la complicité des physiciens. Il y a un siècle, quand on allait chez l'épicier acheter un pot de crème fraîche et une paire de chaussettes, l'épicier devait pour calculer le prix faire l'addition avec un crayon et une feuille de papier, ce qui demandait du temps et comportait des risques d'erreur. Un demi-siècle plus tard, l'épicier avait acquis une machine qui faisait les additions, une sorte de robot très spécialisé. Comme le robot ne savait pas lire, l'épicier devait lui indiquer les nombres à additionner. Il fallait moins de temps et le risque d'erreur était moindre, mais non nul. Aujourd'hui, quand nous allons au supermarché acheter une dizaine d'articles, il suffit de présenter successivement les 10 codes-barres à un robot lecteur qui se charge de la lecture et des additions. Le code-barre est une étiquette qui porte une information simple dans un langage que le robot peut lire plus facilement que les chiffres arabes et l'alphabet latin. De plus, si le supermarché décide de modifier le prix, il peut le faire sans changer l'étiquette. Dans ce dialogue entre une étiquette et un robot lecteur, le robot peut être extrêmement perfectionné et recevoir des ordres de l'autre bout du monde, mais l'étiquette doit être aussi bon marché que possible. Perret et ses collaborateurs remplacent la lecture optique du code-barre ou du QR code (Quick Reading) par une lecture par ondes électromagnétiques à fréquence radio, ce qui permet par exemple de lire des informations dissimulées par une enveloppe opaque. Cela implique évidemment le remplacement du code barre par une étiquette d'un autre genre. De telles étiquettes existent déjà. Elles font appel à la technologie RFID [identification radiofréquence], qui équipe les tickets de bus sans contact, les forfaits de ski, les badges d'entrée dans les immeubles. Ces étiquettes, qui uti-

lisent des « puces » électroniques, ont le défaut d'être nettement plus chères que les codes-barres ou les QR codes. Perret et ses collaborateurs proposent des étiquettes sans puces, à bon marché, lisibles par ondes radio. On trouvera plus de détails dans une entrevue avec l'auteur, sur le site : [https://imtech.wp.imt.fr/2020/11/24/prix-imt-academie-des-sciences-etienne-perret/...](https://imtech.wp.imt.fr/2020/11/24/prix-imt-academie-des-sciences-etienne-perret/) et bien entendu dans l'article du présent numéro spécial.

Ces trois articles donneront au lecteur une idée de la diversité de la recherche actuelle en physique.

Je remercie Antoine Georges, Marc-Henri Julien et Tim Ziman pour leur aide, ainsi que les auteurs.

Jacques Villain
Editor-in-Chief
jvillain@infonie.fr

References

- [1] A. Kanigel *et al.*, "Evolution of the pseudogap from Fermi arcs to the nodal liquid", *Nat. Phys.* **2** (2006), p. 447-451.
- [2] S. E. Sebastian, C. Proust, "Quantum Oscillations in Hole-Doped Cuprates", *Annual Review of Condensed Matter Physics* **6** (2015), p. 411-430.
- [3] M. Hartstein *et al.*, "Hard antinodal gap revealed by quantum oscillations in the pseudogap regime of underdoped high- T_c superconductors", *Nat. Phys.* **16** (2020), p. 841-847.