



## Editorial

## Foreword



A previous historical volume [1] entitled *Science in the making I* covered the period from the creation of the Proceedings (*Comptes rendus*) of the French Academy of Sciences by Arago in 1835 and stopped at the discovery of the neutron and of fission. This new volume is devoted to the period that begins in 1940 and ends in the early 1980s, when the style of the journal has changed as a result of the disaffection of the authors in favor of the Anglo-Saxon press. It is a tribute to editors who succeeded to preserve the existence of this scientific journal during a particularly difficult period, with the destruction of human lives and the disappearance of the material means generated by the Second World War. This volume remains in the spirit of the preceding one, but with an inevitable difference. Before 1940, the notes tell the progress made step by step with the hesitations, sometimes even the errors later corrected, of a research work. On the other hand, after 1940, they report in a concise form the accomplishment of a significant part of a project. Particularly relevant notes can be found, which, once they are put together, constitute the basis of a new field of research, sometimes very vast, which has flourished over several years or even several decades. This particular role will emerge from the concise notes in the *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, published very quickly, focused on a specific result, possibly included later in a more detailed publication. It has happened that this result, which at the time of its publication might have seemed modest, has subsequently proved to be a major step in the establishment of an important theme, even revolutionary. Some of these notes have resulted in review articles in the dossiers published by the *Comptes rendus*. Therefore, in this historical volume, the aim was to highlight the origin of innovative ideas published in the *Comptes rendus*, and then the thread that allowed their development to go up to the emergence of a brand new thematic. The period of the war and the post-war period have been marked by the emergence of new areas of research, whose fallout still surprises us today, as if an intense need for survival and a deep desire to rebuild research in France had galvanized the spirits.

The articles of this special issue are all devoted to physics. We tried to put together the papers related to each particular theme, and to present the various themes in the chronological order as they appeared.

Robert Guillaumont's article is devoted to radioelements and their place in the periodic table. It can be considered as a continuation of the previous historical issue [1], which described the discovery of radioactivity. For this reason, it begins with a brief account of the state of science concerning radioelements. Guillaumont reminds us of the premonitory role of Dmitri Mendeleev: in a note to the *Comptes rendus* published in 1875 in addition to his first presentation of the famous periodic table [2], he indicates how he correctly predicted the existence of gallium and the atomic mass of uranium long before these elements could be isolated. The method invented by Marie Curie to isolate radio-elements present in trace amounts within a mixture had gained widespread acceptance. It is by using this process (fractional co-precipitation [3]) that Marguerite Pérey succeeded in isolating francium, the last natural radioelement discovered, while several other researchers had previously failed [4].

The article by Bernard Barbara evokes the scientific work of Louis Néel. A work focused on magnetism, but deployed on all aspects of this science, from fundamental physics to technology. Barbara also mentions the contribution of some of the many researchers who were students of Louis Néel, or whose works were influenced, directed or inspired by him. Néel has had a strong influence on the science of the twentieth century and on the organization of this science. When he came to Grenoble in 1940, this small Alpine town had no particular academic reputation. Ten years later, it was starting its transformation into a great research center, which now gathers several multinational institutes. This was the result of Néel's scientific competence, but also of his political foresight and his human qualities. The dynamism of Néel appears in his behavior at the beginning of the Second World War, briefly described by Bernard Barbara and a little more in detail in his own biography [5]: in the first weeks Néel was sent to a city in the center of France. In a few days he understood that it served no purpose, explained to the political authorities where he can serve something, and then he went to Paris, Strasbourg, England, Brest, Cherbourg, immunizing French boats against German magnetic mines.

Thanks to Julien Bok and Albert Zylbersztein, we can relive the very beginning of the reconstruction of scientific research in the physics laboratory of the École normale supérieure (ENS), with the arrival of Pierre Aigrain. His trajectory, traced in the very living testimony of Pierre Baruch [6], is quite unusual. It is a surprising destiny, indeed, that of this young pupil at the Naval Academy, “a ship-master who did not like the Navy and, during the whole duration of his military service, did not embark on a warship for more than one month”. During a brilliant master’s degree at the Carnegie Institute of Technology in Pittsburgh, he met the student Claude Dugas, passionate about quantum mechanics as himself, who played an important role in him meeting Yves Rocard, the “talent detector”.

Yves Rocard convinced the young Pierre Aigrain to come back to France with Claude Dugas, to create in 1950 and then to manage the Laboratory of Physics of Solids of ENS, one of the few laboratories in France to have boosted studies on semiconductors. Since 1961, Aigrain has held many official functions, for instance he was General Delegate in the General Delegation for Scientific and Technical Research (DGRST) from 1968 to 1973 and Secretary of State for Research from 1978 to 1981, all this at a time when the Government was very conscious of the importance of developing scientific research in France. These responsibilities did not prevent him from staying close to his laboratory, but as Julien Bok and Albert Zylbersztein testify, he left researchers with a great deal of freedom. This explains the rich fertility of the topics covered in basic research as well as in industry, because Pierre Aigrain was General Technical Director at Thomson before taking on the role of scientific advisor at Thomson and he encouraged spin-offs to the industry.

“The passion to understand, imagine and transmit.” How better to portray Alfred Kastler’s personality than by those few terms chosen by his student Claude Cohen-Tannoudji, who later became his close collaborator [7]. The pluridisciplinarity of his interests is reflected in his work as a physicist reproduced in two large volumes edited by the CNRS [8], with more than 50 notes in the *Comptes rendus de l’Académie des sciences*. Since it was necessary to choose, it seems appropriate to retain here, as an example, his impact on the achievement of the atomic clock in France,<sup>1</sup> a primary frequency standard with a long-term stability, an idea appearing in his pioneering article of 1950 [9]. This subject has motivated Kastler throughout his life and is still very relevant today because of its later impact on major discoveries or applications (e.g., gravitational waves, GPS...). The method finally used was that originally suggested by Kastler: Rabi’s separate field method. The magnetic selector and analyzer are replaced by optical devices capable of producing or detecting dissymmetries between populations of the different atomic sub-levels by optical pumping. To achieve a genuine standard of frequency, the great difficulty encountered comes from the need to keep the atoms away from any disturbance over the entire period between the moment of entry of the atoms into the two devices, the one that creates the field selection and the one that analyses it; this is the interrogation time. Thus it is necessary to avoid the collisions against a wall or on a foreign gas, even a neutral gas. The acrobatics performed by Pierre Cerez and Maurice Arditi consisted in placing an atomic beam of rubidium atoms inside a sealed glass cell previously evacuated, so that the atoms are in free flight for the interrogation time [10]. Experimental progress took place first at the Laboratory of Atomic Clock and then at SYRTE [11] thanks to the exploitation of radiative cooling methods allowing the realization of cold cesium and rubidium atom fountains, [12] and in particular the double fountain that operates on both species in a unique set-up. Entrusted to the expert hands of Jocelyne Guéna – a former Kastler student of the third generation – this extraordinary tool has made it possible to regularly accumulate the high-precision data needed to participate in the determination of international atomic time. What is more, Jocelyne has been able to continually improve its performance and has turned it into an extremely valuable tool for completing fundamental physics tests [13].

In fact, many of Kastler’s ideas could have remained unexplored and the international prestige of his laboratory at ENS could have missed the day light without the return to France of Jean Brossel in 1951 and without the magnificent agreement that has established itself between these two personalities whose skills complemented each other perfectly. This is Brossel who succeeded, on his return from the United States, to gather the necessary material in a lab totally empty to achieve the first demonstration of the validity of the method of optical pumping. Then, very methodically and with an admirable care, assisted by young ENS students, he undertook to pursue and to probe, in turn, the validity of the ideas contained in this same historical paper that Kastler had published in 1950. One of the very rare surprises encountered was at the origin of many works. It is described in the article “The early days of quantum optics in France” by Claude Cohen-Tannoudji.

At the beginning of the 1950s, one could believe that optics and the study of atomic structures had achieved all their objectives and that new major developments could no longer be expected. In fact, it is the opposite that has occurred, the realization of the atomic clock as well as the two articles that follow illustrate the unexpected fecundity of these domains, now known as quantum optics and atomic physics. Claude Cohen-Tannoudji gives us specific examples of the impressive developments that marked that era. He himself introduced the basic concepts needed to interpret optical pumping signals and validated the predictions in his thesis, entitled *Quantum Theory of the Optical Pumping Cycle. Experimental verification of new expected effects* [14], a landmark that every young person entering the lab had to read and assimilate thoroughly. The article presented in this volume reflects only the first part of his career as a physicist. At the very end of the twentieth century, his deep understanding of the atom–radiation interaction and the progress of techniques that became available for the manipulation of lasers allowed him to make new discoveries: with a few collaborators, Cohen-Tannoudji invented cooling techniques of the external degrees of freedom of atoms and proposed radiative trapping. But this part of his research

<sup>1</sup> Kastler was the head of the Laboratoire de l’horloge atomique (a CNRS laboratory), from 1957 to 1973 as seen at pages 9 and 10 of a CNRS document: [https://www.siv.archives-nationales.culture.gouv.fr/siv/rechercheconsultation/consultation/ir/pdfIR.action?irId=FRAN\\_IR\\_051125](https://www.siv.archives-nationales.culture.gouv.fr/siv/rechercheconsultation/consultation/ir/pdfIR.action?irId=FRAN_IR_051125).

is not included here, because it would have gone beyond the scope of this volume, it was the subject of a book, entitled *Advances in Atomic Physics: An Overview* [15] and also files published in the framework of the *Comptes rendus* [16].

The following article is an example giving an idea of the impact of research carried out in the Kastler Brossel laboratory, but which could only be mentioned very briefly in the broad panorama describing the multiple activities that have emerged in the 1970s. This is spectroscopy without a Doppler width, a proposal launched in the laboratory by Bernard Cagnac and the progress of experiments ranging from the observation of a two-photon resonance in sodium to the production of ever more precise tests of the atomic and nuclear properties of hydrogen. It is a tribute to Bernard Cagnac, who had the daring idea to launch this project despite the surrounding skepticism and found the solutions to overcome the very first hurdles. The article is written by François Biraben, the young researcher recruited at the beginning of the project, who has refined the successive versions of the experiment for nearly five decades, and who has become a world-renowned expert in the field: a talented experimenter, able to compete with a giant of high-precision spectroscopy such as Ted Hänsch.

Christian Bordé's contribution is also related to optics. Bordé comes from the community of molecular infrared spectroscopy. He gives a novel description of the new possibilities available after 1970 when opticians were able to use marvellous tools as lasers and electro-optical devices allowing a control of all properties of the emitted light. Bordé had acquired a dual training, first as an experimenter, especially during a stay at Boulder in the team of John Hall, and later as a theorist. His imagination always on the watch is stimulated by his theoretical culture and guided by experimental concerns. In this volume, he traces the progress of a whole field of research that extends from saturation spectroscopy to atomic interferometry, which is today highly relevant. He describes the links and the passage from the first theme to the second, both experimentally and theoretically through his own work. With Christian Bordé, we have as with Kastler and Cohen-Tannoudji, the example of a whole scientific work, progressively deployed through notes to the *Comptes rendus*.

For those who knew Anatole Abragam in the late 1950s, pacing the basement corridors of the physics department of the ENS at a very late hour, with Jean Combrisson looking for a can of liquid nitrogen, it is clear that he was passionate about research. Anatole Abragam had studied radioelectricity, first in Paris in the *École supérieure d'électricité* (1945–1947), then in Oxford (1948–1950) and Harvard (1952–1953), where he discovered nuclear magnetic resonance with Purcell [17]. Back to France, he quickly had a profound influence on the reconstruction of research in that country. He also contributed, in association with Albert Messiah and Claude Bloch, to modernize the scientific education, as whole areas of modern physics were still ignored in the French universities. A great pedagogue, he had gathered a diligent audience among whom Alfred Kastler – who considered himself as a perpetual student – and the youngest students in his laboratory. Also present were researchers of the group of theoretical physics formed by Maurice Lévy, who occupied temporary premises at the *École normale*, and everyone used to mount in a bus once a week in the direction of Saclay, where Abragam and his colleagues were teaching.

In Saclay, Abragam led a group of researchers who later became renowned physicists. One of them, Maurice Goldman, preoccupied by the practical applications of nuclear magnetic resonance, presents here a review of dynamic nuclear polarization methods. His article recalls the essential mechanisms involved when two ensembles of electronic and nuclear spins that can interact with each other are irradiated by a field, either radiofrequency or optical. Under certain coupling conditions between them, it may appear a considerable strengthening of the nuclear polarization with respect to its value at thermal equilibrium. A large number of spin-offs result in fields as different as nuclear physics and medicine.

Guy Laval and René Pellat initiated plasma physics in France from the moment when research on controlled fusion ceased to be classified, when it finally became possible to have access to all the results obtained in plasmas confined using a magnetic field ("Atoms for Peace" Geneva Conference 1958). With his usual modesty, Guy Laval gives us a lively, clear, and synthetic review of the historical development of magnetic confinement fusion. The scientific contributions to the *Comptes rendus* about this development over several decades is highlighted. The author makes it possible to understand the importance of the role of all the instabilities that can appear inside the plasma and shorten its duration of confinement. But the understanding of the mechanism involved in the occurrence of these instabilities is in some cases very complex and unfortunately does not tolerate simplifying approximations to obtain a representative analytic description. This is the case, in particular, of the current theoretical questions related to microtearing (turbulence microtearing) mentioned at the end of the article. We understand the origin of the difficulties encountered in the production of energy by controlled fusion, which leads the author to take a lucid look at the long-term predictions. But, even if some challenges remain, the theorists of plasma physics remain determined to tackle them.

Michel Davier traces the beginnings of research in particle physics in France. He begins by evoking the roles of Pierre Auger, Louis Leprince-Ringuet, and their teams, as well as the first steps of André Lagarrigue (1924–1975), when he acquired a training in particle physics, before arriving at the major discovery of electro-weak neutral currents that rocked the world of particle physics... and finally the fireworks results that followed his discovery. Michel Davier himself tells us: "I wanted to put things in their context and show the extraordinary scientific trajectory and the impact of the results of Lagarrigue quite in phase (and stakeholder) with the development of modern particle physics." In addition, many will remember that Lagarrigue was simultaneously strongly involved in the renovation of the teaching of physical sciences and technology in high schools, within the framework of the famous Commission Lagarrigue, first unofficial and finally formalized by the Ministry (1971). André Lagarrigue was a particularly endearing personality, a kindly man, paying the same attention to all members of his team, technicians as researchers. His natural authority made him occupy the position of leader.

The physics of condensed matter has also considerably developed thanks to the emergence of new themes. The Laboratory of Solid Physics (LPS) was created in 1958 in Orsay (20 km south of Paris) as an extension of the nuclear physics and theoretical physics laboratory of the ENS under the leadership of Yves Rocard and Maurice Levy. The three founders were André Guinier the eldest, Raimond Castaing, and Jacques Friedel, respectively from CNAM (National Conservatory of Arts and Crafts), ONERA (National Office for Studies and Aerospace Research), and École des mines; each had previously developed a team in his own institution. As Denis Jérôme [18] tells us, “everyone was surrounded by experienced students, [...] they had solid experience and the success of the LPS owes a lot to the combination of these complementary talents as well as their previous experience” added to their human qualities. “They were joined by Pierre-Gilles de Gennes, who spent 10 years there from 1961 to 1971 [...] In 1968, Pierre Aigrain, then director of the DGRST, found ways to enlarge the premises by building on the Plateau du Moulon the building of 10,000 m<sup>2</sup> that we know today. The founders “shared many wishes: to closely couple research with specialized education; to relate the properties (electronic, magnetic, optical and mechanical) of the material with its organization (structures and imperfections); to couple the experiment with the theory and to develop an original scientific instrumentation; to give a place of choice to crystallogeneses as to synthetic (organic) chemistry.” Friedel himself provided a living testimony of this period in his memoirs [19].

The following two articles describe André Guinier's work on the local order in condensed matter, and the inventions of Raimond Castaing. There is no article in this volume devoted to the work of Jacques Friedel; a whole volume had been previously published to testify to the impact of his work on the community [20]. But it is important to emphasize Friedel's role as a counselor for research organization in France. He used to be carefully listening to when consulted by his peers and his role, mostly informal, was all the more valuable that it came from a righteous man, aiming primarily at the general interest.

In their tribute to André Guinier (1911–2000), Jean-Paul Pouget, Anne-Marie Levelut, and Jean-François Sadoc explain how, a little before the Second World War, appeared an interest in the distribution of X rays out of the Bragg singularities. Thus, the diffusion of X-rays at small angles (SAXS) made it possible to identify and characterize the zones of Guinier–Preston, responsible for the aging of certain alloys. Much later, wide-angle X-ray scattering (WAXS) revealed in some materials a short-distance unidirectional correlation order. This scattering outside Bragg peaks also finds its development in the study of amorphous materials and liquid crystals.

In a general way, as Denis Jérôme [18] notes, “the successes of the LPS are inseparable from experimental progress made at a smaller and smaller scale”. In particular, the name of Raimond Castaing evokes the microprobe that bears his name in French (in English EPMA: Electron Probe by Micro Analysis), it had been developed at ONERA before the creation of LPS. The principle is to analyze the X-rays emitted by a sample bombarded by electrons: it is conceivable that the rearrangement of the perturbations induced by the electrons is accompanied by the emission of X-rays specific to the excited atoms; the improvements in the device, which are inseparable from electron microscopy and scanning imaging, allow for very specific quantitative analyzes and therefore considerable progress in all the laboratories involved in crystallogeneses, metallurgy, or the study of materials. The company CAMECA has marketed since the 1960s and 1970s hundreds of devices. The ion probe, a device for secondary ionization mass spectrometry, proceeds from another principle: ion bombardment induces the emission of ions that is analyzed by a mass spectrometry device: this is to a pupil of Raimond Castaing, George Slodzian, that one is indebted to have developed in Orsay this very powerful tool of local analysis, chemical and isotopic. The ion probe is a classic equipment, complementary to the electron microprobe and implanted in the same laboratories. In this volume, Christian Colliex, a student of Raimond Castaing, of second generation, reminds us of his role as the creator of scientific instruments.

To establish an analogy between certain phase transitions in liquid crystals and the transition of a metal from its normal state to a superconducting state is the kind of exploit in which Pierre-Gilles de Gennes excelled. He captivated his audience at the Collège de France by presenting suggestive images based on some very simple equations, a little like telling a story to children. On leaving the class, the researchers, who were enthralled by the teacher's charisma, could think that they had understood everything. But, as a matter of fact, behind all this apparent clarity and simplicity was hidden a deep reflection and more abstraction than it seemed! This is reflected in his notes to the *Comptes rendus*. Pierre-Gilles de Gennes was very attached to this journal, he appreciated the short and concise format and the very fast publication of the notes. When the journal had to adapt to the changes that have shaken the publishing world in the late 1980s, he has been one of the first to propose the addition of review articles to the short notes about novel topics selected by editors. It would have been useless to enumerate here all the advances that the work of Pierre-Gilles de Gennes has permitted in vast fields of science, many of which were still unexplored [21,22]. In this volume, Pawel Pieranski was called upon to revive the fruitfulness of his work on the example of liquid crystals and their phase changes; he shows how this work has succeeded to inspire new advances, even today.

An example of the stimulating influence of de Gennes towards young researchers appears in the article by Juan Rodriguez-Carvajal and Jacques Villain. It is devoted to the magnetic structures of crystalline solids, that is, to the organization of atomic magnetic moments. This article, like the other ones in this issue, includes a historical section, devoted mainly to the inventory and classification of magnetic structures. But it also includes a review of very recent work on the determination of magnetic structures from experimental data (mainly neutron diffraction). A conceptual novelty that the study of magnetic structures brought to the physics of crystals was the possibility of incommensurable structures, where the magnetic order has a periodicity different from the crystalline structure (itself somewhat perturbed by magnetostriction). In the diffraction spectrum, the intensity is concentrated at discrete points in the reciprocal space, as in any crystal,

but there is an infinity of those points (or Bragg peaks) in a finite volume of the reciprocal space. This property was later found in non-magnetic materials, including quasicrystals.

The discovery of quasicrystals is precisely the subject of the article by Denis Gratias and Marianne Quinquandon. A historical article that one, and even prehistoric, because it also evokes the work announcing their possible existence before their discovery in 1984. Work of which the great chemist Linus Pauling was apparently not aware when he disputed the existence of quasicrystals. Like an incommensurable material, a quasicrystal can be considered as the section by our three-dimensional space of a periodic crystal of higher dimension; a concept of which Gratias shows the importance. But the physical mechanism for the formation of quasicrystals is not so easy to understand. Landau's theory of continuous phase transitions can very well explain the formation of incommensurable (magnetic) phases, but cannot account for the order of symmetry observed in quasicrystals. A more microscopic explanation is based on what is called the Hume–Rothery mechanism (Friedel and Denoyer in 1987 [23], Takeuchi and Mizutani in 1995 [24], Janssen et al. in 2007 [25]), which is still nowadays stimulating for crystallographers.

But the research themes at LPS have never ceased to surprise us. Albert Fert joined the LPS in Orsay in 1966. His doctoral work arises from a suggestion by Neville Mott linking the mobility of electrons in a ferromagnetic metal to the orientation of their spin. It was soon after the arrival in that same laboratory of Ian Campbell, then a young PostDoc who had just completed an experimental PhD work at Oxford under the direction of Kurti. The scientific discussions between Jacques Friedel and Ian Campbell had finally focused on the interest of the problem of conduction in low-temperature transition ferromagnetic metals, and the importance of providing an experimental test of Mott's suggestion. Albert Fert was thus put in charge of this subject under the supervision of Ian Campbell. He then made measurements on samples of iron and nickel, confirming the existence of an effect of the spin of the electrons on their mobility.

As early as the end of the 1960s, Albert Fert and Ian Campbell made progress in the theoretical interpretation: its origin can be understood in the two-current model (spins up and spins down), involving collisions with momentum exchange and spin reversal [26]. The interaction involved occurs only at very short range and, in a normal material, the effect is weak and has few applications. On the other hand, it becomes important if one increases the surface effects, for example in a multilayer structure, a “mille-feuilles”. It was only in the 1980s that new experimental techniques (Molecular Beam Epitaxy) made it possible to grow a crystal by superimposing layers of ultra-thin nanometric thickness. This led Albert Fert to approach the Thomson CSF laboratory (now the CNRS and Thales Joint Research Unit), where some of his former students and his new PostDocs, including Frédéric Nguyen Van Dau, were developing this technique. It is at this point that spintronics is born and spectacular successes followed at smart pace.

The article by Albert Fert and Frédéric Nguyen Van Dau shows the development of spintronics, an electronics that controls not only electric charge currents, but also spin currents. The practical importance of this science results in particular from its application to computer technology. The story begins in 1988 with the discovery that the multilayer resistivity can be very different depending on the relative orientation of the magnetizations of the magnetic layers (determined by the absence or the presence of an external magnetic field). This phenomenon, called giant magnetoresistance, has allowed a sharp increase in the information stored in hard disks. The next generations of computers will also consume less energy thanks to spintronics, in particular those using topological insulators, materials to which our journal devoted a dossier in November–December 2013. The end of the article is devoted to magnetic skyrmions, another incursion of topology in physics. The skyrmions were born around 1958 with Tony Skyrme's attempt to explain the strong nuclear interaction. It was a failure, skyrmions disappeared from nuclear physics. But they have recently reappeared with magnetic skyrmions. Fert and Nguyen Van Dau hope for a bright future in our technologies.

After having gone through this long list of physicists who participated in the reconstruction of research in France at the end of the Second World War, the reader must not conclude that it is an exhaustive list. It should be remembered that this is a restricted one because it is based on articles published in the *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Although this journal has played an important role in stimulating research over four decades, it has not received support from all physicists. Among the omissions, we must mention those of the theoretical physics, which, following the creation of CERN, took on an international dimension. This field of research has been on the international scene throughout the 1970s and has been particularly active in France. We can not forget the role of Philippe Meyer, interrupting his studies at Harvard to engage in free French forces... later settling in France and leading the laboratory of theoretical physics at Orsay and then, in 1974, under the leadership of Jean Brossel, teaming up with Claude Bouchiat to create the Laboratory of Theoretical Physics (LPTENS) at ENS, which had a very important role thanks to its demanding recruitment criteria and its international prestige. Many physicists still remember the Paris–Rome–Utrecht triangular encounters, in which Luciano Maiani, Daniel Amati, Tini Veltman, Gerard t'Hooft, and their students took part, as well as the Summer Institutes, very lively since the early seventies, which were attended by renowned physicists, Sheldon Glashow, Sidney Coleman, Stanley Mandelstam, as well as François Englert, joined by Jean Iliopoulos, André Neveu, Pierre Fayet, without omitting Claude Itzinkson, Édouard Brézin, specialists of statistical physics from the group of theoretical physics in Saclay. In the columns of *Physics Letters B*, we can find the (successful and unsuccessful) attempts that contributed to the construction of the standard electroweak model, and the numerous experimental tests which established its validity and then went on to the direct observation of the  $Z_0$  and, much later of the Higgs boson... but the true story experienced at the LPTENS could be the subject of a whole volume.

From the present story summarizing impressive advances in physics over just four decades, we can learn many lessons. It is clear that the majority of them could only appear thanks to technological advances, but we must also recognize that, in return, it is the conceptual advances that bring about technological progress, progress appreciated in fields very different

from those who aroused them. In this sense, all branches of science are interconnected [27]. Two well-known examples are omnipresent in our daily lives: lasers and magnetic memories have played a vital role in many scientific adventures. Moreover, the politicians will find examples of the large impact on the long-term results coming from judiciously governed, well-endowed research laboratories: from these structures have emerged unanticipated scientific discoveries. We also hope that this story can motivate very young researchers to read the scientific literature of the past. What benefits can they derive? Let us listen to Raymond E. Goldstein, who has been very interested in this question [28] and gives several tips that he adorns with detailed examples leading to the advice:

Learn of connections between fields, strive to escape the narrow silos we inhabit and explore other fields... Be accurate in claims of novelty, the effect or idea may have been discovered previously in other areas... Do not join the collective discredit of an idea without having bothered to think for yourself... Learn how to browse in the literature and learn to extract the origin of creative ideas. This is an important quality of the scientific researcher. We hope that reading this volume will help him to achieve this type of approach.

## Avant-propos

Un précédent volume historique, intitulé *La science en mouvement I*, couvrait la période allant de la création des *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* par Arago en 1835 et s'arrêtait à la découverte du neutron et de la fission vers 1940 [1]. Ce nouveau volume est consacré à la période qui débute en 1940 et s'achève au début des années 1980, lorsque le style de la revue a changé par suite de la désaffection des auteurs au profit de la presse anglo-saxonne. Il est un hommage aux rédacteurs qui ont su préserver l'existence de cette revue scientifique durant une période particulièrement difficile du fait de la Seconde Guerre mondiale, avec les destructions de vies humaines et la disparition des moyens matériels qui en résulta. Ce volume reste dans l'esprit du précédent, mais avec toutefois une différence inévitable. Avant 1940, les notes racontent les progrès réalisés pas à pas, avec les hésitations, parfois même les erreurs, plus tard corrigées, d'une recherche qui est en cours. En revanche, après 1940, elles relatent, sous une forme concise, l'accomplissement d'une étape, éventuellement partielle, mais significative d'un projet. On peut trouver des notes particulièrement marquantes qui, une fois réunies, parviennent à faire émerger un nouveau champ de recherche, parfois très vaste, qui s'est épanoui ensuite sur plusieurs années, voire même plusieurs dizaines d'années. On verra se dégager ce rôle particulier des notes aux *Comptes rendus*, concises, publiées très vite, ciblées sur un résultat précis, parfois repris dans une publication plus détaillée. Il est arrivé que ce résultat qui, au moment de sa publication, pouvait sembler modeste, s'est par la suite révélé être une étape majeure dans la mise sur pied d'une thématique importante, voire révolutionnaire. Parmi elles, certaines ont donné lieu, plus tardivement, à des articles de revue dans les dossiers publiés aux *Comptes rendus*. Aussi, dans ce volume historique le but a été de mettre en valeur l'origine d'idées novatrices parues dans les *Comptes rendus*, et puis le fil conducteur qui a permis leur épanouissement pour aller jusqu'à l'émergence d'une toute nouvelle thématique. La période de la guerre et de l'après-guerre ont en effet été marquées par l'émergence de nouveaux domaines de recherche, dont les retombées nous surprennent encore aujourd'hui, comme si un intense besoin de survie et un désir profond de reconstruire la recherche en France avait galvanisé les esprits.

Tous les articles réunis dans ce volume relèvent d'une seule discipline, la physique. Nous avons essayé de regrouper tous les articles relevant d'une même thématique, et de présenter les différents thèmes en suivant l'ordre de leur apparition. L'article de Robert Guillaumont, le premier de ce volume, concernant les radioéléments et leur classement dans le tableau périodique, a une particularité : il fait suite à un article du précédent volume historique [1], qui relatait la découverte de la radioactivité. C'est pourquoi il débute par une présentation rapide de l'état de la science relative aux radioéléments. Robert Guillaumont nous rappelle le rôle prémonitoire de Dmitri Mendeleev : dans une note aux *Comptes rendus* parue en 1875 outre sa première présentation du célèbre tableau périodique [2], il indique comment il avait correctement prédit l'existence du gallium ainsi que la masse atomique de l'uranium, bien avant que ces éléments aient pu être isolés. La méthode inventée par Marie Curie pour isoler les radioéléments présents à l'état de traces au sein d'un mélange a fait école. C'est en ayant recours à ce procédé (co-précipitation fractionnelle [3]) que Marguerite Pérey a réussi à isoler le francium, dernier radioélément naturel découvert, là où plusieurs autres chercheurs avaient auparavant échoué [4].

L'article de Bernard Barbara évoque l'œuvre scientifique de Louis Néel. Une œuvre focalisée sur le magnétisme, mais déployée sur tous les aspects de cette science, depuis la physique fondamentale jusqu'à la technologie. Barbara évoque aussi la contribution de quelques-uns des multiples chercheurs qui furent les élèves de Louis Néel, ou dont les travaux furent influencés, dirigés ou inspirés par lui. Néel eut une influence forte sur la science du vingtième siècle et sur l'organisation de cette science. Si Grenoble, petite ville de province sans grandes prétentions universitaires quand Néel s'y installe en 1940, commence dix ans plus tard sa mutation en grand centre de recherche et pôle des technologies, de dimensions internationales, c'est grâce à Néel, à sa compétence scientifique, à sa clairvoyance politique, mais aussi à son désintéressement et à ses autres qualités humaines. Le dynamisme de Néel apparaît bien dans son comportement au début de la Seconde Guerre mondiale, brièvement décrit par Barbara et un peu plus en détail par Néel lui-même dans son autobiographie [5] : dans les premières semaines, on envoie Néel dans une ville du centre de la France. En quelques jours, il comprend qu'il n'y sert à rien, explique aux autorités politiques où il peut servir à quelque chose, et le voilà parti à Paris, à Strasbourg, en Angleterre, à Brest, à Cherbourg, où il immunise les navires français contre les mines magnétiques allemandes.

C'est grâce à Julien Bok et Albert Zylbersztein que nous pouvons revivre le tout début de reconstruction de la recherche scientifique au sein du laboratoire de physique de l'École normale supérieure (ENS), avec l'arrivée de Pierre Aigrain. Sa trajectoire retracée dans le très vivant témoignage de Pierre Baruch [6] est tout à fait atypique. Surprenant destin, en effet, que celui de ce jeune élève à l'École navale, «enseigne de vaisseau qui n'aimait pas la Marine, qui ne s'embarqua en tout et pour tout qu'une seule fois sur un vaisseau de guerre, et qui dut passer un mois en mer pendant toute la durée de son service militaire». Durant un brillant *master* au Carnegie Institute of Technology, à Pittsburgh, il y rencontra Claude Dugas, étudiant passionné comme lui-même, qui joua un rôle important dans sa rencontre avec le détecteur de talents Yves Rocard.

Ce fut le mérite de Yves Rocard de convaincre le tout jeune Pierre Aigrain de revenir en France avec Claude Dugas, pour créer en 1950, puis pour diriger ensuite le laboratoire de physique des solides de l'ENS, l'un des seuls en France à avoir impulsé les études sur les semi-conducteurs. À partir de 1961, Aigrain a occupé toutes les fonctions permettant de développer la recherche en France et d'assurer son rayonnement international : il est devenu directeur scientifique des Recherches et Moyens d'essai au ministère des Armées (DRME) de 1961 à 1965, directeur des Enseignements supérieurs de 1965 à 1967, délégué général au sein de la Délégation générale de la recherche scientifique et technique (DGRST) de 1968 à 1973, secrétaire d'État à la Recherche de 1978 à 1981, tout ceci à une époque où le gouvernement était très sensible à l'importance qu'il y avait à développer la recherche scientifique en France. Ces responsabilités ne l'ont pas empêché de rester proche de son laboratoire, mais, comme en témoignent Julien Bok et Albert Zylbersztein, il laissait aux chercheurs une très grande liberté. Ceci explique la riche fécondité des thèmes abordés, aussi bien en recherche fondamentale que dans l'industrie, car Pierre Aigrain fut aussi directeur technique général chez Thomson, avant d'occuper le poste de conseiller scientifique du groupe Thomson et il favorisa l'essai vers l'industrie.

«La passion de comprendre, d'imaginer et de transmettre.» Comment mieux dépeindre la personnalité d'Alfred Kastler que par ces quelques termes choisis par son élève, Claude Cohen-Tannoudji, plus tard devenu son proche collaborateur [7]. La pluridisciplinarité de ses intérêts transparaît dans son œuvre de physicien, reproduite dans deux gros ouvrages du CNRS [8], avec plus de 50 notes aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Puisqu'il fallait choisir, il paraît judicieux de retenir ici, à titre d'exemple, son impact sur la réalisation de l'horloge atomique en France, un étalon de fréquence primaire doté d'une grande stabilité à long terme, une idée figurant dans l'article pionnier de 1950 [9]. Ce sujet a motivé Kastler toute sa vie durant, et demeure aujourd'hui encore d'une grande actualité en raison de son impact sur de grandes découvertes ou d'importantes applications ultérieures (ondes gravitationnelles, GPS...). La méthode utilisée a finalement été celle qu'avait initialement suggérée Kastler, la méthode des champs séparés de Rabi. Les sélecteurs et analyseurs magnétiques sont remplacés par des dispositifs optiques capables de produire ou de détecter des dissymétries entre populations des différents sous-niveaux atomiques, par pompage optique. Pour réaliser un véritable étalon de fréquence, la grande difficulté rencontrée vient de la nécessité de tenir les atomes à l'abri de toute perturbation sur toute la durée qui sépare l'instant d'entrée des atomes dans chacun des deux dispositifs, celui qui crée le champ de sélection puis celui d'analyse ; c'est le temps d'interrogation. Il s'agit en effet d'éviter les collisions, soit sur une paroi, soit sur un gaz, même un gaz neutre. L'acrobatie réalisée par Pierre Cérez et Maurice Arditi a donc consisté à placer un jet atomique de rubidium à l'intérieur d'une cellule en verre étanche scellée sous vide, de telle sorte que l'atome soit en vol libre pendant le temps d'interrogation [10]. Les améliorations se sont enchaînées d'abord au laboratoire de l'Horloge atomique,<sup>2</sup> puis au SYRTE [11] grâce à l'exploitation des méthodes de refroidissement radiatif permettant la réalisation de fontaines à atomes froids de césium et de rubidium, et en particulier la fontaine double césium–rubidium. Confié aux mains expertes de Jocelyne Guéna – ancienne étudiante de Kastler de troisième génération –, cet outil extraordinaire a permis d'accumuler régulièrement les données de haute précision nécessaires pour participer à la détermination du temps atomique international [12]. Qui plus est, améliorant sans cesse ses performances, Jocelyne a pu le transformer en un outil extrêmement précieux pour l'accomplissement de tests de physique fondamentale [13].

En fait, la majorité des idées de Kastler auraient pu rester lettre morte et le prestige international de son laboratoire à l'ENS ne pas voir le jour sans le retour en France de Jean Brossel en 1951 et sans la magnifique entente qui s'est établie entre ces deux personnalités, dont les compétences se complétaient parfaitement. C'est Brossel qui réussit, à son retour des États-Unis, à réunir le matériel nécessaire dans un laboratoire entièrement vide pour réaliser d'abord la première démonstration de la validité de la méthode du pompage optique, puis, très méthodiquement et avec un soin admirable, secondé par de jeunes normaliens, qui entreprit de poursuivre et de sonder, tour à tour, la validité des idées contenues dans ce même papier historique que Kastler avait publié en 1950. L'une des très rares surprises rencontrées fut à l'origine de nombreux travaux. Elle est décrite dans l'article de Claude Cohen-Tannoudji, «The early days of quantum optics in France».

Au début des années 50, on pouvait croire que l'optique et l'étude des structures atomiques avaient atteint tous leurs objectifs et qu'on ne pouvait plus en attendre de développements nouveaux importants. En fait, c'est l'opposé qui s'est produit ; la réalisation de l'horloge atomique ainsi que les deux articles qui suivent illustrent la fécondité inattendue de ces deux domaines devenus l'optique quantique et la physique atomique. Claude Cohen-Tannoudji nous donne des exemples précis des développements impressionnants qui ont marqué cette époque. Lui-même a introduit les concepts de base nécessaires à l'interprétation des signaux de pompage optique et en a validé les prédictions dans sa thèse, un ouvrage intitulé *Théorie quantique du cycle de pompage optique. Vérification expérimentale des nouveaux effets prévus* [14], qui fit date et que tout

<sup>2</sup> Kastler fut directeur du laboratoire de l'Horloge atomique (laboratoire du CNRS) de 1957 à 1973, comme on peut le voir en pages 9 et 10 d'un document du CNRS : [https://www.siv.archives-nationales.culture.gouv.fr/siv/rechercheconsultation/consultation/jir/pdfR.action?irId=FRAN\\_IR\\_051125](https://www.siv.archives-nationales.culture.gouv.fr/siv/rechercheconsultation/consultation/jir/pdfR.action?irId=FRAN_IR_051125).

jeune entrant au laboratoire se devait de lire et d'assimiler à fond. Mais l'article présenté dans ce volume ne reflète que la première partie de sa carrière de physicien. À la fin des années 1980 et par la suite, sa compréhension très profonde de l'interaction atome-rayonnement et les progrès des techniques devenues disponibles pour la manipulation des lasers l'ont conduit, avec quelques collaborateurs, à l'invention de procédés de refroidissement des degrés de liberté externes des atomes et à la proposition du piégeage radiatif. Mais tout ce volet de sa recherche n'est pas inclus ici, car il aurait dépassé le cadre de ce volume. Il a fait l'objet d'un livre, *Advances in Atomic Physics: An overview* [15] et aussi de dossiers publiés dans le cadre des *Comptes rendus de l'Académie des sciences* [16].

L'article suivant est là à titre d'exemple pour donner une idée de l'impact des recherches menées dans le laboratoire Kastler Brossel, mais qui n'ont pu être mentionnées que très brièvement dans le large panorama décrivant les multiples activités ayant émergé dans les années 1970. Il s'agit de la spectroscopie sans largeur Doppler, proposition lancée par Bernard Cagnac, et de la progression des expériences allant de l'observation d'une résonance à deux photons dans le sodium jusqu'à la réalisation de tests toujours plus précis des propriétés atomiques et nucléaires de l'hydrogène. C'est un hommage à Bernard Cagnac, qui a eu l'audace de lancer ce projet malgré le scepticisme ambiant et qui a trouvé les solutions pour franchir les tout premiers obstacles. L'article est écrit par François Biraben, jeune chercheur recruté au début du projet, qui a perfectionné les versions successives de l'expérience pendant près de cinq décennies, et qui est devenu un expert mondialement réputé dans le domaine, un expérimentateur de grand talent, capable de rivaliser avec un géant de la spectroscopie de haute précision tel que Ted Hänsch.

Toujours dans la même thématique, Christian Bordé, issu de la communauté de la spectroscopie moléculaire infrarouge, nous donne une vue originale et complémentaire des nouveaux pouvoirs offerts dans les années 1970 aux opticiens, à la suite de la mise sur le marché d'outils extraordinaires : les lasers et les systèmes électro-optiques permettant de contrôler toutes les propriétés de la lumière émise. Christian Bordé a acquis une double formation, d'abord une formation d'expérimentateur, en particulier au cours d'un séjour à Boulder dans l'équipe de John Hall, et plus tard de théoricien ; son imagination toujours aux aguets, stimulée par la première, reste guidée par la seconde. Dans ce volume, il retrace la progression de tout un champ de recherche, qui s'étend de la spectroscopie de saturation à l'interférométrie atomique, aujourd'hui d'une grande actualité. Il décrit les liens et le passage du premier thème vers le second, à la fois sur le plan expérimental et sur le plan théorique, au travers de ses propres travaux. Avec Christian Bordé, nous avons, comme avec Kastler et Cohen-Tannoudji, l'exemple de toute une œuvre scientifique, progressivement déployée au travers de notes aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*.

Pour qui a connu Anatole Abragam, vers la fin des années 1950, arpenter les couloirs du sous-sol du département de physique de l'ENS à une heure très tardive, en compagnie de Jean Combrisson, à la recherche d'un bidon d'azote liquide, il est bien clair qu'il fut un passionné de la recherche. À cette époque, l'enseignement de la physique en France avait beaucoup stagné et était très en retard sur celui en vigueur dans les pays anglo-saxons. Anatole Abragam avait ressenti le besoin de compléter sa formation en radioélectricité en allant étudier à Oxford d'abord, puis à Harvard, où il découvrit la résonance magnétique nucléaire auprès de Purcell [17]. Retrouvant son poste au CEA à Saclay, il a rapidement eu une influence profonde sur la reconstruction de la recherche en France en s'associant à Albert Messiah et Claude Bloch pour l'enseignement de pans entiers de la physique moderne, encore ignorés dans les facultés. Grand pédagogue, il réunissait une audience assidue dans laquelle on rencontrait Alfred Kastler – qui se considérait comme un perpétuel étudiant – et les plus jeunes étudiants de son laboratoire. Étaient aussi présents ceux du Groupe de physique théorique dirigé par Maurice Lévy qui occupait des locaux temporaires à l'École normale, et tout ce petit monde se regroupait dans un autocar une fois par semaine en direction de Saclay... Anatole Abragam a animé un groupe de chercheurs devenus plus tard physiciens réputés. C'est l'un d'eux, Maurice Goldman, préoccupé par les applications pratiques de la résonance magnétique nucléaire, qui présente ici une revue des méthodes de polarisation nucléaire dynamique. Son article rappelle les mécanismes essentiels mis en jeu quand deux ensembles de spins électroniques et nucléaires pouvant interagir entre eux sont irradiés par un champ, soit de radiofréquence, soit optique. Dans certaines conditions de couplage entre les deux ensembles, il peut apparaître un renforcement considérable de la polarisation nucléaire par rapport à sa valeur à l'équilibre thermique. De très nombreuses retombées en résultent dans des domaines aussi différents que la physique nucléaire et la médecine.

Guy Laval et René Pellat ont initié la physique des plasmas en France à partir du moment où la recherche sur la fusion contrôlée a cessé d'être classifiée et où il devint enfin possible d'avoir accès à l'ensemble des résultats obtenus dans des plasmas confinés à l'aide d'un champ magnétique (la conférence « Atoms for Peace » de Genève, en 1958). Avec sa modeste habitude, Guy Laval nous livre une revue vivante, claire et synthétique du développement historique de la fusion par confinement magnétique. La contribution scientifique des *Comptes rendus de l'Académie des sciences* à ce développement est mise en évidence. L'article permet de comprendre l'importance du rôle de toutes les instabilités pouvant apparaître à l'intérieur du plasma et abrégé sa durée de confinement. Mais la compréhension du mécanisme participant à l'apparition de ces instabilités est, dans certains cas, très complexe et ne tolère malheureusement pas d'approximations simplificatrices pour obtenir une description analytique parlante. C'est le cas, en particulier, des questions théoriques actuelles liées aux microdéchirures (*turbulence microtearing*) évoquées à la fin de l'article. On comprend l'origine des difficultés rencontrées dans la production d'énergie par fusion contrôlée, ce qui conduit l'auteur à jeter un regard lucide sur les prédictions à long terme. Mais, même si des défis restent à relever, les théoriciens de la physique des plasmas restent bien décidés à s'y attaquer.

Michel Davier retrace les débuts de la recherche en physique des particules en France. Il commence par évoquer les rôles de Pierre Auger, de Louis Leprince-Ringuet et de leurs équipes, ainsi que les premiers pas d'André Lagarrigue (1924–1975),



quand il acquiert une formation en physique des particules, avant d'en arriver à la découverte majeure des courants neutres électrofaibles, qui a secoué le monde de la physique des particules... et enfin le feu d'artifice des résultats qui ont suivi sa découverte. Michel Davier lui-même nous dit : «J'ai voulu replacer les choses dans leur contexte et montrer l'extraordinaire trajectoire scientifique et l'impact des résultats de Lagarrigue tout à fait en phase (et partie prenante) avec le développement de la physique des particules moderne.» En outre, beaucoup se souviendront de ce que Lagarrigue s'est simultanément fortement impliqué dans la rénovation de l'enseignement des sciences physiques et de la technologie dans les lycées, dans le cadre de la célèbre commission Lagarrigue, tout d'abord officieuse, puis finalement officialisée par le ministère (1971). André Lagarrigue était une personnalité particulièrement attachante, un homme bienveillant, portant la même attention à tous les membres de son équipe, techniciens comme chercheurs. Son autorité naturelle a fait qu'il s'est retrouvé occuper la place de leader.

La physique de la matière condensée s'est aussi considérablement développée grâce à l'émergence de thèmes nouveaux. Le laboratoire de physique du solide (LPS) fut créé en 1958 à Orsay comme une extension du laboratoire de physique nucléaire et de physique théorique de l'ENS, sous l'impulsion d'Yves Rocard et de Maurice Lévy. Les trois fondateurs étaient André Guinier, le plus âgé, Raimond Castaing et Jacques Friedel, venus respectivement du Conservatoire national des arts et métiers, de l'Onera (Office national d'études et de recherches aérospatiales) et de l'École des mines ; chacun avait préalablement développé une équipe dans sa propre institution. Comme nous le dit Denis Jérôme [18] «chacun entouré d'élèves confirmés [...] ils avaient une solide expérience et le succès du LPS doit beaucoup au regroupement de ces talents complémentaires comme à leur expérience antérieure» ainsi qu'à leurs qualités humaines. Ils furent rejoints par Pierre-Gilles de Gennes, qui y passa dix ans, de 1961 à 1971... En 1968, Pierre Aigrain, devenu directeur de la DGRST, trouva les moyens pour agrandir les locaux en faisant construire sur le plateau du Moulon le bâtiment de 10 000 m<sup>2</sup> que nous connaissons aujourd'hui. Les fondateurs «partageaient plusieurs volontés : coupler étroitement la recherche à un enseignement spécialisé ; mettre en relation les propriétés (électroniques, magnétiques, optiques et mécaniques) de la matière avec son organisation (structures et imperfections) ; coupler l'expérience avec la théorie et développer une instrumentation scientifique originale ; faire une place de choix à la cristallogénèse comme à la chimie (organique) de synthèse.» Friedel lui-même a fourni un vivant témoignage de cette période dans ses mémoires [19]. Les deux articles qui suivent décrivent l'œuvre d'André Guinier sur l'ordre local en matière condensée, et les inventions de Raimond Castaing. Il n'y a pas d'article dans ce volume consacré à l'œuvre de Jacques Friedel, à qui tout un dossier de la revue a été antérieurement consacré pour témoigner de l'impact de son œuvre sur la communauté [20]. Mais il importe de souligner le rôle de conseiller pour l'organisation de la recherche qu'a eu Friedel, toujours à l'écoute quand il était consulté par ses pairs. C'était un rôle le plus souvent informel et d'autant plus précieux qu'il venait d'un homme juste, visant en priorité l'intérêt général.

Dans leur article d'hommage à André Guinier (1911–2000) Jean-Paul Pouget, Anne-Marie Levelut et Jean-François Sadoc exposent comment, un peu avant la deuxième guerre mondiale, on commença à s'intéresser à la diffusion des rayons X hors des singularités de Bragg. C'est ainsi que la diffusion des rayons X aux petits angles (SAXS) permit d'identifier et de caractériser les zones de Guinier–Preston, responsables du vieillissement de certains alliages. Bien plus tard, la diffusion des rayons X aux grands angles (WAXS) put mettre en évidence, dans certains matériaux, un ordre à courte distance à corrélation unidirectionnelle. Cette diffusion hors-Bragg trouve aussi son épanouissement dans l'étude des matériaux amorphes et des cristaux liquides.

De manière générale, comme le fait remarquer Denis Jérôme [18], «les réussites du LPS sont inséparables des progrès expérimentaux, à une échelle de plus en plus fine». En particulier, le nom de Raimond Castaing évoque la microsonde qui porte son nom (en anglais EPMA : *Electron Probe by Micro Analysis*), mise au point à l'Onera, donc avant la création du LPS. Le principe est d'analyser les rayons X émis par un échantillon bombardé par des électrons : on conçoit que le réarrangement des perturbations induites par les électrons s'accompagne de l'émission de rayons X spécifiques des atomes excités ; les perfectionnements du dispositif, inséparables de la microscopie électronique et de l'imagerie par balayage, permettent des analyses quantitatives très ponctuelles, donc des progrès considérables dans tous les laboratoires concernés par la cristallogénèse, la métallurgie ou l'étude des matériaux. La société CAMECA a commercialisé depuis les années 1960 et 1970 des centaines de dispositifs. La sonde ionique, dispositif de spectrométrie de masse à ionisation secondaire, procède d'un autre principe : le bombardement ionique induit l'émission d'ions qu'on analyse par un dispositif de spectrométrie de masse : c'est à un élève de Raimond Castaing, George Slodzian, qu'il revient d'avoir développé à Orsay cet outil très performant d'analyse locale, chimique et isotopique. La sonde ionique constitue un équipement classique, complémentaire de la microsonde électronique et implanté dans les mêmes laboratoires. Christian Colliex, élève de Raimond Castaing, de seconde génération, nous rappelle ici le rôle de ce dernier en tant que créateur d'instruments scientifiques.

Établir une analogie entre certains changements d'état de cristaux liquides et un sujet aussi éloigné que la transition d'un métal de son état normal à un état supraconducteur, c'est le genre d'exploit dans lequel Pierre-Gilles de Gennes excellait. Il captivait son audience au Collège de France en présentant des images suggestives s'appuyant sur quelques équations très simples, un peu comme on raconte une histoire aux enfants. En sortant du cours, les chercheurs subjugués par le charisme du professeur pouvaient penser qu'ils avaient tout compris. Mais il ne fallait pas s'y laisser tromper : derrière toute cette clarté et cette simplicité apparentes se cachaient une réflexion profonde et plus d'abstraction qu'il n'y paraissait ! Ce qui transparaît dans ses notes aux *Comptes rendus*. Pierre-Gilles de Gennes était très attaché à ce journal, il appréciait le format bref et concis des notes et leur publication très rapide. Lorsque la revue a dû s'adapter aux mutations qui ont secoué le monde de l'édition à la fin des années 1980, il a été l'un des premiers à proposer l'addition aux notes brèves d'articles de revue relatifs à des sujets d'actualité sélectionnés par les éditeurs. Il aurait été vain d'énumérer ici toutes les avancées

que l'œuvre de Pierre-Gilles de Gennes a permises dans de vastes domaines de la science, dont plusieurs étaient encore non défrichés [21,22]. Dans ce volume, il a été fait appel à Pawel Pieranski pour nous faire revivre la fécondité de ses travaux sur l'exemple des cristaux liquides avec leurs changements de phase et illustrer comment ils parviennent, encore aujourd'hui, à inspirer de nouvelles avancées.

Un exemple du rôle stimulant de Pierre-Gilles de Gennes, encourageant notamment les jeunes chercheurs, apparaît dans l'article de Juan Rodriguez-Carvajal et Jacques Villain. Cet article est consacré aux structures magnétiques des solides cristallins, c'est-à-dire à l'organisation des moments magnétiques atomiques. Cet article, comme les autres constituant le présent numéro, comporte une partie historique, consacrée principalement à l'inventaire et à la classification des structures magnétiques. Mais il inclut aussi un exposé de travaux très récents sur la détermination des structures magnétiques à partir des données expérimentales (essentiellement issues d'études par diffraction de neutrons). Une nouveauté conceptuelle que l'étude des structures magnétiques apporta à la physique des cristaux fut la possibilité de générer des structures incommensurables, où l'ordre magnétique a une périodicité différente de celle de la structure cristalline (elle-même un peu perturbée par la magnétostriction). Dans le spectre de diffraction, il apparaît alors une intensité concentrée en des points discrets de l'espace réciproque, comme dans tout cristal, mais il y a une infinité de ces points (ou pics de Bragg) dans un volume fini de l'espace réciproque. Cette propriété se retrouva par la suite dans des matériaux non magnétiques, et notamment les quasicristaux.

La découverte des quasi-cristaux fait précisément l'objet de l'article de Denis Gratias et Marianne Quinquandon. Un article historique, celui-là, et même préhistorique, car il évoque aussi les travaux annonciateurs parus avant la découverte de 1984. Travaux dont le grand chimiste Linus Pauling n'avait apparemment pas connaissance quand il contesta l'existence des quasi-cristaux. Comme un matériau incommensurable, un quasi-cristal peut être considéré comme la section par notre espace à trois dimensions d'un cristal périodique de dimension supérieure, un concept dont Gratias montre l'importance. Mais le mécanisme physique de la formation des quasi-cristaux n'est pas aussi facile à comprendre. La théorie de Landau des transitions de phase continues peut très bien expliquer la formation de phases incommensurables (magnétiques, par exemple), mais ne peut rendre compte de la symétrie d'ordre 5 observée dans les quasi-cristaux. Une explication plus microscopique est basée sur ce qu'on appelle le mécanisme de Hume-Rothery (Friedel et Denoyer 1987 [23], Takeuchi et Mizutani 1995 [24], Janssen et al. 2007 [25]), qui stimule toujours l'intérêt des cristallographes.

Mais les thèmes de recherche au LPS n'ont pas cessé de nous apporter des surprises. Albert Fert a rejoint ce laboratoire en 1966. Son travail de doctorat a été suscité par une suggestion de Neville Mott liant la mobilité des électrons dans un métal ferromagnétique à l'orientation de leur spin. C'était peu après l'arrivée, dans ce même laboratoire, de Ian Campbell, alors jeune post-doctorant venant de terminer un travail expérimental de PhD à Oxford sous la direction de Kurti. Les discussions scientifiques entre Jacques Friedel et Ian Campbell avaient fini par se concentrer sur l'intérêt du problème de la conduction dans les métaux ferromagnétiques de transition à basse température, et l'importance d'offrir une vérification expérimentale à la proposition de Mott. Albert Fert fut ainsi chargé de ce sujet, sous la supervision de Ian Campbell. Il entreprit alors des mesures sur des échantillons de fer et de nickel, qui ont confirmé l'existence d'un effet du spin des électrons sur leur mobilité. Dès la fin des années 1960, Albert Fert et Ian Campbell font progresser l'interprétation théorique : son origine peut se comprendre dans le modèle à deux courants (spins en haut et spins en bas), mettant en jeu les collisions avec échange de quantité de mouvement et retournement de spin [26]. L'interaction mise en jeu est à très courte portée et, dans un matériau normal, l'effet est faible et n'a guère d'applications. En revanche, il devient important si on accroît les effets de surface, par exemple dans une structure multicouche, « en mille-feuilles ». C'est seulement dans les années 1980 que de nouvelles techniques expérimentales (épitaxie par jets moléculaires) permettent de faire croître un cristal en superposant des couches d'atomes ultra minces, d'épaisseur nanométrique. Ceci conduisit Albert Fert à se rapprocher du laboratoire Thomson CSF (maintenant unité mixte de physique CNRS et Thales), où certains de ses anciens étudiants et ses nouveaux post-doctorants, dont Frédéric Nguyen Van Dau, développent cette technique. C'est à ce moment là que la spintronique voit le jour et que des succès spectaculaires s'enchaînent.

L'article d'Albert Fert et Frédéric Nguyen Van Dau expose ici le développement de la spintronique, une électronique contrôlant non seulement des courants de charge électrique, mais aussi des courants de spin. L'importance pratique de cette science résulte notamment de son application à la technologie des ordinateurs. L'histoire débute en 1988 avec la découverte de ce que la résistance de multicouches peut être très différente selon l'orientation relative des aimantations des couches magnétiques (déterminée par l'absence ou la présence d'un champ magnétique extérieur). Ce phénomène, appelé magnétorésistance géante, a permis une forte augmentation de l'information stockée dans les disques durs. Les prochaines générations d'ordinateurs consommeront aussi moins d'énergie grâce à la spintronique, en particulier celle utilisant des isolants topologiques, matériaux auxquels notre revue consacra un numéro spécial en novembre-décembre 2013. La fin de l'article est consacrée aux skyrmions magnétiques, autre incursion de la topologie en physique. Les skyrmions naquirent vers 1958, avec la tentative d'explication de l'interaction nucléaire forte par Tony Skyrme. Ce fut un échec, les skyrmions disparurent de la physique nucléaire. Mais ils ont récemment réapparu avec les skyrmions magnétiques. Fert et Nguyen Van Dau en espèrent un brillant avenir dans nos technologies.

Après avoir parcouru cette longue liste de physiciens qui ont participé à la reconstruction de la recherche en France à la fin de la Deuxième Guerre mondiale, le lecteur ne doit pas conclure qu'il s'agit d'une liste exhaustive. Il faut se rappeler qu'il s'agit d'une liste restreinte du fait qu'elle est dressée à partir des publications parues dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Même si cette revue a joué un rôle important pour stimuler la recherche sur quatre décennies, elle n'a pas

recueilli une adhésion de tous les physiciens. Parmi les omissions, nous devons citer la physique théorique qui, à la suite de la création du CERN, a rapidement pris une dimension internationale. Or, ce champ de recherche s'est trouvé porté sur le devant de la scène internationale tout au long des années 1970, et il a été particulièrement actif en France. On ne peut pas oublier le rôle de Philippe Meyer interrompant ses études à Harvard pour s'engager dans les forces françaises libres... plus tard s'installant en France et animant le laboratoire de physique théorique d'Orsay. Et puis, en 1974, sous l'impulsion de Jean Brossel, Philippe Meyer s'est associé à Claude Bouchiat pour créer le laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure (LPTENS), qui a joué un rôle de tout premier plan grâce à ses critères de recrutement exigeants et à son rayonnement sur le plan international. Tous se souviennent des rencontres triangulaires Paris–Rome–Utrecht, auxquelles participaient Luciano Maiani, Daniel Amati, Tini Veltman, Gerard t'Hooft et leurs élèves, mais aussi des instituts d'été, très animés dès le début des années 1970, auxquels se joignaient Sheldon Glashow, Sidney Coleman, Stanley Mandelstam, François Englert et bien d'autres, ainsi que Jean Iliopoulos, André Neveu, Pierre Fayet. Il ne faut pas oublier ceux issus du groupe de physique statistique de Saclay, avec Claude Itzinkson et Édouard Brézin... On pourra retrouver dans les colonnes de *Physics Letters B* les tentatives (fructueuses et infructueuses) qui ont contribué à la construction du modèle standard électrofaible, et les très nombreux tests expérimentaux établissant sa validité puis sont allés jusqu'à l'observation directe du  $Z_0$  et, beaucoup plus tard du boson de Higgs... mais l'histoire vécue au LPTENS pourrait à elle seule faire l'objet de tout un volume.

De cette histoire résumant les avancées impressionnantes survenues en physique sur seulement quatre décennies, nous pouvons retenir bien des leçons. Il est clair que la majorité d'entre elles n'ont pu apparaître que grâce à des avancées technologiques, mais il faut aussi reconnaître qu'en retour ce sont les avancées conceptuelles qui font naître des progrès technologiques, progrès appréciés dans des domaines très différents de ceux qui les ont suscités. En ce sens, toutes les branches de la science se trouvent interconnectées [27]. Deux exemples bien connus sont omniprésents dans notre vie quotidienne : les lasers et les mémoires magnétiques ont eu un rôle essentiel dans maintes aventures scientifiques. Le politicien responsable de la recherche peut y trouver des exemples de l'impact que peut avoir sur le long terme la création de laboratoires de recherche judicieusement dirigés et dotés : de ces structures ont émergé des découvertes scientifiques qu'on ne pouvait prévoir.

Nous souhaitons aussi que cette histoire puisse motiver les très jeunes chercheurs à lire la littérature scientifique du passé. Quels bénéfices peuvent-ils en retirer ? Laissons-nous nous inspirer par Raymond E. Goldstein, qui s'est beaucoup intéressé à cette question [28] et donne plusieurs conseils qu'il agrémenté d'exemples détaillés.

Apprendre à reconnaître les liens entre différents domaines et échapper à l'étroit silo que nous sommes habitués à fréquenter... Être très rigoureux au sujet des priorités, l'effet ou l'idée concerné peut avoir été découvert antérieurement dans un autre domaine... Ne pas se joindre au discrédit collectif d'une idée sans avoir pris la peine d'y réfléchir soi-même... Savoir fureter dans la littérature et apprendre à en extraire l'origine des idées créatrices. C'est là une qualité importante du chercheur scientifique. Nous souhaitons que la lecture de ce volume soit une aide pour parvenir à ce type de démarche.

## References

- [1] Science in the making: *Comptes rendus de l'Académie des sciences* throughout history, C. R. Physique 18 (2017) 489–600 (dossier).
- [2] M.D. Mendeleev, Remarques à propos de la découverte du gallium, C. R. hebdomadaire des séances Acad. sci. 81 (1875) 969–972 (available on Google Scholar).
- [3] M. Perey, J. Phys. Radium 10 (10) (1939) 435–438, <https://doi.org/10.1051/jphysrad:019390010010043500>.
- [4] M. Perey, Nouvelle méthode de fractionnement des terres rares actinifères, J. Chim. Phys. 46 (1949) 485–493, <https://doi.org/10.1051/jcp/1949460485>.
- [5] L. Néel, *Un siècle de physique*, Éditions Odile Jacob, Paris, 1991.
- [6] P. Baruch, L. Bantigny, Pierre Aigrain et le laboratoire de physique des solides de l'École normale supérieure. Genèse et développements des semi-conducteurs : 1948–1965, Bull. Soc. Fr. Phys. 136 (2002) 4–11, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00088219>.
- [7] B. Cagnac, Alfred Kastler, portrait d'un physicien engagé, Éditions Rue d'Ulm/Presses de l'École normale supérieure, Paris, 2013, [www.pressens.fr](http://www.pressens.fr).
- [8] A. Kastler, J. Phys. Radium 11 (1950) 255.
- [9] P. Cerez, M. Arditi, A. Kastler, Horloge atomique à jet de rubidium à pompage optique, C. R. hebdomadaire des séances Acad. sci. 267 (1968) 282.
- [10] A. Kastler, Œuvres complètes, Paris, Éditions du CNRS, Paris, 1988.
- [11] <https://syrite.obspm.fr/spip/>.
- [12] M. Abgrall, B. Chupin, L. De Sarlo, J. Guéna, Ph. Laurent, Y. Le Coq, R. Le Targat, J. Lodewyck, M. Lours, P. Rosenbusch, D. Rovera, S. Bize, Atomic fountains and optical clocks at SYRTE: status and perspectives, C. R. Physique 16 (5) (2015) 461–470.
- [13] A. Hees, J. Guéna, M. Abgrall, S. Bize, P. Wolf, Searching for an oscillating massive scalar field as a dark matter candidate using atomic hyperfine frequency comparisons, Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 061301.
- [14] C. Cohen-Tannoudji, Théorie quantique du cycle de pompage optique. Vérification expérimentale des nouveaux effets prévus, Thèse d'État, Paris, Ann. Phys. Paris 7 (1962) 423 & 469.
- [15] C. Cohen-Tannoudji, D. Guéry-Odelin, *Advances in Atomic Physics: An Overview*, World Scientific, 2011.
- [16] H. Perrin, P. Lemonde, F. Pereira dos Santos, V. Josse, D. Comparat, Application of lasers to ultra-cold atoms and molecules, C. R. Physique 12 (4) (2011) 417–432.
- [17] S. Haroche, <https://journals.openedition.org/annuaire-cdf/1459>.
- [18] D. Jérôme, La brillante histoire du laboratoire de physique des solides d'Orsay, <https://www.lps.u-psud.fr/spip.php?article2534>.
- [19] J. Friedel, *Graine de mandarin*, Éditions Odile Jacob, Paris, 1994.
- [20] Physique de la matière condensée au XXI<sup>e</sup> siècle : l'héritage de Jacques Friedel, C. R. Physique 17 (2017) 233–495.
- [21] P.G. de Gennes', Impact on science, in: J. Bok, J. Prost, F. Brochard-Wyart (Eds.), *Solid State and Liquid Crystals*, vol. I, World Scientific, 2009.
- [22] P.G. de Gennes', Impact on science, in: J. Bok, J. Prost, F. Brochard-Wyart (Eds.), *Soft Matter and Biophysics*, vol. II, World Scientific, 2009.
- [23] J. Friedel, F. Denoyer, The quasi Crystal AlLiCu, a Hume-Rothery alloy, C. R. Acad. Sci. 305 (1987) 171.
- [24] T. Takeuchi, U. Mizutani, Electronic structure, electron transport properties, and relative stability of icosahedral quasicrystals and their 1/1 and 2/1 approximants in the Al-Mg-Zn alloy system, Phys. Rev. B 52 (1995) 9300.

- [25] T. Janssen, G. Chapuis, M. de Boissieu, *Aperiodic Crystals: From Modulated Phases to Quasicrystals*, Oxford University Press, 2007, Chapitre 5.
- [26] Albert Fert, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/fert/lecture/>.
- [27] Recherche et Innovation Quel avenir? Colloque du Collège de France. Collège, de France, PROGRAMME COLLOQUE DE RENTRÉE 2019.
- [28] R.E. Goldstein, Lessons from the old literature, *Phys. Today* 71 (2018) 32.

Marie-Anne Bouchiat<sup>a</sup>, Jacques Villain<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Laboratoire Kastler Brossel, ENS-PSL, CNRS, Sorbonne Université et Collège de France, Paris, France*

<sup>b</sup>*Theory Group, Institut Laue-Langevin (ILL), 38054 Grenoble cedex 9, France*