MAX PLANCK INSTITUTE
FOR THE HISTORY OF SCIENCE

2021

Preprint N°508

Scientific Developments Connected with the Second Industrial Revolution: A. Baracca, S. Ruffo, and A. Russo, *Scienza e Industria 1848-1915*, 41 years later

Angelo Baracca

Scientific Developments Connected with the Second Industrial Revolution

A. Baracca, S. Ruffo, and A. Russo, *Scienza e Industria 1848–1915*, 41 years later

Angelo Baracca

Professor of Physics and History of Physics, University of Florence

Table of Contents

"Science and Industry" – An Unjustly Forgotten Treasure of the History of Science

A Preface by Jürgen Renn 3

Productive and Social Transformations and Scientific Changes during the Nineteenth Century (1848–1915) 7

1. The historical framework: the revolution in the history of science in Italy in the 1970s: The breeding ground of *Scienza e Industria* 7

2. The peculiar approach and the contents of *Scienza e Industria, 1848–1915:* Connecting scientific changes to certain social economic transformations 13

3. Introductory considerations: Modern science and the First Industrial Revolution of the eighteenth century 14

Part 1: Science and bourgeois power, 1848–1873: Overcoming the phenomenological approach in science and the adoption of models 16
- Positivism in the early nineteenth century 16
- The revolutions of 1848: New social subjects burst onto the scene 17
- The introduction of models in physics and chemistry in the 1850s 17

Part 2: The Second Industrial Revolution 21
- The take-off in Germany 21
- The driving role of German chemistry 22
- Competition with the British industry 26

Part 3: Science and the Second Industrial Revolution 27
- The controversies among physicists on the role of theories and mechanics 27
- The chemists beyond mechanicism and reductionism 31

Part 4: The birth of the new physics 33
- Planck's papers of 1900 33
- The true revolution in twentieth-century physics: Einstein's contributions of 1902–1905 36
- Nernst theorem, 1906: The confluence of new physics with the approach introduced by nineteenth-century chemists 38

Part 5: The early atomic models 40

Appendix: Technical Considerations 44

1. Thermodynamic functions and chemical equilibrium 44

2. The change in statistical mechanics with respect to kinetic theory 44

3. Planck's first thermodynamic calculation in 1900 45

4. Planck's formula as interpolation between Wien's and Rayleigh's formulations 45

5. The second of Planck's 1900 calculations 45

6. The physical meaning of the function $\left(\frac{\partial 2\,s}{\partial \varepsilon 2}\right)^{-1}$ and the wave-particle duality 46

7. Stimulated emission of radiation and Planck's law 46

Scienza e Industria 1848–1915: Gli Sviluppi Scientifici Connessi alla Seconda Rivoluzione Industriale. 48

A reprint of the original publication 48

“Science and Industry” – An Unjustly Forgotten Treasure of the History of Science

A Preface by Jürgen Renn

The 1960s and 1970s saw a revival of the history of science in which science was understood not just as a history of disembodied ideas but as a human activity deeply rooted in social and cultural conditions. This revival was in line with earlier attempts in this direction, undertaken before World War II by scholars such as Boris Hessen, Henryk Grossmann, Edgar Zilsel, or Ludvik Fleck, whose work had meanwhile largely fallen into oblivion. The new perspectives on science were, just as their precursors in the 1930s, also connected with the political upheavals of the time, which stimulated the quest for understanding the relation between modern science and capitalist societies. Some of the scholarly work of these years was, however, also in danger of being forgotten or pushed aside as were these earlier works of the 1930s.

Among the reasons for this marginalization was the fact that the authors were typically not professional historians of science but more often scientists, teachers, or philosophers, as well as their association with the political left, which made them suspicious to mainstream historians and established historians of science. In addition, their work was often not accessible in English and therefore did not circulate internationally. Thus, remarkably, a Marxist revival of the history of science took place in the West, almost simultaneously, in Greece, Israel, Italy, France, Spain, Britain, Germany, and other countries, without much contact among the protagonists. Only over the years, with the growing international prominence of a cultural history of science for which the Max Planck Institute became a global reference point, did the different perspectives come into contact with each other and with newly emerging trends in the history of science.

Although a plethora of detailed and highly professional studies of the cultural and social contexts of science has meanwhile become available, a look back at some of the pioneering works of the last third of the twentieth century may be worthwhile, not the least because of their still untapped potential, but more importantly because their key questions are still relevant: How does science depend on societal or cultural contexts and how is it connected, in particular, with the capitalist mode of production? And even more urgently, what kind of scientific practices and insights do we actually need in order to cope with some of the devasting consequences of this mode of production that were already visible then, and which today have become undeniable to the extent

that they give rise to the definition of a new geological epoch called the "Anthropocene," which some prefer to designate as the "Capitalocene"?

Scienza e Industria 1848–1915: Gli sviluppi scientifici connessi alla seconda rivoluzione industriale (Science and Industry 1848–1915: Scientific developments related to the second industrial revolution) by Angelo Baracca, Stefano Ruffo, and Arturo Russo was published in Italian by Laterza in 1979 and is one such pioneering work—an unjustly forgotten treasure of a highly fertile and innovative period of the history of science.

In his introduction to this reprint, Angelo Baracca aptly describes the historical circumstances in which this book and the approach it proposes emerged. It covers a wide range of subjects, from the different ways in which the Second Industrial Revolution unfolded in Great Britain and in continental Europe to the upheaval in modern science, in particular in chemistry in the latter half of the nineteenth century and in physics at the beginning of the twentieth century. Although each of these themes has meanwhile become the subject of detailed historical investigations, the survey and overall picture that *Scienza e Industria* provides is still intriguing: it connects the new knowledge economy of the Second Industrial Revolution with the conceptual revolutions in modern physics by pointing to the mediatory role of chemistry.

Chemistry was undoubtedly a key science of the Second Industrial Revolution, of paramount importance to the mining and steel industries, to the nascent agricultural science and, of course, primarily to the burgeoning chemical industry itself. Its scientific practice and conceptual frameworks were largely independent from those of physics, yet there were important points of contact, overlaps, and areas of conflict. Some of the challenging problems of late nineteenth-century chemistry emerged from industrial applications, among them the dependence of chemical reactions on physical conditions such as temperature and pressure, the nature and determination of chemical equilibria, the design of molecules with specific chemical properties, and so forth.

These challenging problems of chemistry, of urgent importance to its industrial applications, became, at the same time, borderline problems with physics. The notions of atoms belonged to both fields of knowledge where they were, however, conceived in different ways. The notions of temperature and pressure became, in the middle of the century, part of a novel physical theory, thermodynamics, with its own conceptual framework on a par with that of mechanics, and applicable to both physical and chemical processes. Physical chemistry turned into a major

driving force of this new subdiscipline of physics, from the work of Gibbs to that of Nernst. In addition, chemistry provided much of the empirical material for the later quantum physics, from the spectra to the periodic table of elements.

In addition to bringing certain challenging problems into focus, the mediatory role of chemistry, forming a bridge between economic developments in the course of the Second Industrial Revolution and conceptual transformations of physics, also extended to the style of doing research—this is another thought-provoking thesis of *Scienza e Industria*: In contrast to the struggle about the feasibility of a comprehensive world picture characteristic of late classical physics, the chemistry that was important for the Second Industrial Revolution is described here as a more pragmatic science, neither bound to an encompassing foundation of all of science—be it mechanical, thermodynamical, or electromagnetic—nor adverse to model building as was the case among positivistically-minded physicists.

The new style characteristic of post-classical physics, from Einstein's 1905 papers to the 1913 quantum theory of Bohr, was characterized by the introduction of fundamental principles like that of the constancy of the speed of light, modelled after the use of such principles in thermodynamics, as well as by experimenting with daring hypotheses about the microstructure of radiation and matter, such as Einstein's light quantum hypothesis or Bohr's atomic model. According to *Scienza e Industria*, this new style had been pioneered by chemistry and by its the openness to non-mechanical model-building, but also by the lesson it had taught physics about the guidance in unexplored territories that thermodynamics could provide as a generic framework, one not bound to specific microscopic assumptions.

Several aspects of this book, published more than 40 years ago, are outdated; this is hardly surprising in view of the massive amount of research that has since been invested into the diverse fields it covers. Nevertheless, such comprehensive surveys, connecting historical accounts of societal developments with detailed technical analyses of conceptual developments in the sciences, have remained rare. May *Scienza e Industria* serve as an encouragement for historians of science not to shy away from such difficult and daring investigations, as risky as they inevitably are! The payoff is worth the risk: only by understanding science as a part of larger societal developments can we (and we must!) shape science and industry into part of a sustainable relationship between the human species and its home planet, and avoid their potential role in self-destruction.

Productive and Social Transformations and Scientific Changes during the Nineteenth Century (1848–1915)

1. The historical framework: the revolution in the history of science in Italy in the 1970s: The breeding ground of *Scienza e Industria*

In Italy during the 1970s, a new generation of young, concerned physicists and mathematicians (myself included), riding the wave of the protest movement of 1968, developed a deep uneasiness with respect to the content, methodological approach, and organization of their scientific activity. The active responses generated by this dissatisfaction aimed not only to develop concrete scientific alternatives but also sought to understand how modern science was a byproduct of the class-based capitalistic mode of production and its intrinsic logic of exploitation.[1]

With regard to concrete alternatives, new approaches were proposed and developed that broke with established academic methods and practices in related fields. For instance, various proposals were developed concerning the health conditions of factory workers. These suggestions were made in close cooperation with the laborers and drew from the concept that damage to the health of workers is a consequence of the capitalistic organization and exploitation of labor. In another example, some young (and particularly energetic) physicists channeled their frustration with the exasperating proliferation of model approaches[2] into a critique of the foundations of quantum mechanics, which had then shifted from a philosophical debate in the 1920s and 1930s to an emphasis on practical, experimental tests based on the Bell inequality.[3]

---

[1] For a general survey of the various initiatives, see the monographic issue of *Pristem/Storia* of Bocconi University, Milan, n. 27/28, December 2010, edited by Angelo Guerraggio, on "Il '68 e la scienza in Italia."

[2] The criticism of the methodological approach of the research into elementary particle physics was systematically studied by Silvio Bergia and myself in *La Spirale delle Alte Energie* (The High-Energy Spiral), Milan, Bompiani, 1975. A recent overview of the initiatives of the young Italian physicists has been presented in: Angelo Baracca, Silvio Bergia and Flavio Del Santo, (2016). "The origins of the research on the foundations of quantum mechanics (and other critical activities) in Italy during the 1970s." *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics:*DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.shpsb.2016.11.003.

[3] While the United States simultaneously experienced a revived interest into the problems of quantum mechanic principles, the motivations and perspectives that accompanied the movement were radically different from those in Italy. An excellent study by David Kaiser, *How the Hippies Saved Physics* (2012), meticulously reconstructs the revival in the US, which transpired in the second half of the 1970s after a long period of almost total indifference toward the philosophical aspects (originating from cuts to research funds), and the consequent identity crisis among the younger generation of physicists. In particular, the *Fundamental Fysiks* Group in Berkeley was inspired by the atmosphere of the widespread New Age mood and oriental mysticism; they even took psychedelic substances in an attempt at psychokinesis, transmission of thought, and superluminal communication. The revival of interests in the

The second concern, that is, generating an innovative approach to the history of science, probably triggered the more long-lasting byproduct. In order to understand the situation, one must stress that in Italy, a school of history and philosophy of science (though generally excluding physics) already existed. It was founded by the renowned Ludovico Geymonat (1908–1991), who was succeeded by others such as Paolo Rossi Monti (1923–2012) and Lucio Colletti (1924–2001). All of them had a humanistic education and basically practiced "dialectical materialism."[4] The majority of the young physicists (and mathematicians) who had no previous experience with historical activity soon harbored an increasing dissatisfaction toward the positions of Geymonat's school. They accused the administration of disregarding the social and economic framework that they considered essential (at least more so than the "dialectic") to understanding the class component sedimented in scientific approaches, context, and organization. As they saw it, the historical and epistemological reconstructions of the Geymonat school turned into a legitimization of science and its objective nature. In this respect, the young scholars sought to redeem Marx's true approach in "historical materialism" from what they saw as the out-of-touch Marxism of their teachers.

The year 1972 was a crucial date: The Italian Society of Physics at the International School in Varenna, Italy organized a summer course on the history of physics that brought together the most authoritative scholars on the subject. Its particular importance is also embodied in the fact that research in the history of modern science was studied (at an international level) by professional physicists, instead of by scholars with a humanistic background who could not grasp the physical, technical, and mathematical aspects. On this basis, the young physicists (and mathematicians) gradually began to conduct research on the history of physics, in the course of which the divergence from and number of (sometimes harsh) polemics against the "school of Geymonat" increased.

I began my own thesis research for a didactic degree in 1973, written together with Riccardo

---

foundations of quantum mechanics began earlier in Italy (dating back to the end of the 1960s). There, it was directed instead toward the perspectives of experimental tests of quantum theory and the possibility of falsifying it. One must admit, however, that the American movement was not entirely frivolous, despite their somewhat metaphysical goals. "The [*Fundamental Fysiks*] group's intense, unstructured brainstorming sessions planted seeds that would eventually flower into today's field of quantum information science" (Kaiser 2012, Introduction).

[4] The Italian Marxist school of thought had very influential exponents in general historians, who set the ideological basis for the "Italian way to communism." Many of them were leaders of the Italian Communist Party, such as Eugenio Garin (1909–2004), the mathematician Lucio Lombardo Radice (1916–1982), Ernesto Ragionieri (1926–1975), and Giuseppe Vacca. The new political movements ideologically clashed with the Marxist ideology and political positions of these exponents. Such a divergence grew also in the field of science.

Rigatti.[5] Tracing the *Transactions of the Royal Society* in 1759, we investigated the roots of the technical and scientific contributions of the English "engineer" John Smeaton (1724–1792) and related the origin of the physical concept of (productive) *work* and *power* to the development of the eighteenth-century Industrial Revolution. We also began the search for the roots of thermodynamics in the steam engine and Watt's invention of the separate condenser.[6]

I must emphasize that this whole growing group of young, radical historians of physics had (directly or indirectly) an important master in Marcello Cini (1923–2012), a more experienced physicist and a decidedly left-wing and politically engaged scholar who had been expelled from the Italian Communist Party in 1969 together with the group *Il Manifesto*.[7]

Systematic research in the (critical) history of science grew from a self-organized national group into an academic activity. Theses for physics degrees on subjects previously considered unusual in the history of physics gradually began to be carried out in various faculties in Italy. They were often seen with disfavor by the establishment but were well accepted by many students, who were tired of an excessively formal teaching style and welcomed these changes as a breath of fresh air.[8] Some of these theses, assigned by colleagues in Rome, were particularly important and instructive for me in order to improve my methodological approach in the analysis of nineteenth-century physics and in the theory of special relativity (Gianni Battimelli's thesis was of particular significance). For the latter aspect, I also benefitted from the participation of Silvio Bergia in the national "Relativity Project," directed by Giulio Cortini.

A more important and enduring consequence matured during the 1970s at the academic level,

---

[5] Angelo Baracca and Riccardo Rigatti, "Aspetti dell'interazione tra scienza e tecnica durante la rivoluzione industriale inglese del XVIIIº sec. in Inghilterra, 1ª Parte: La nascita dei concetti di lavoro ed energia," *Giornale di Fisica*, 15, 144, 1974.

[6] Angelo Baracca and Riccardo Rigatti, "Aspetti dell'interazione tra scienza e tecnica durante la rivoluzione industriale inglese del XVIIIo sec. in Inghilterra, 2ª Parte: Sviluppo della macchina a vapore," *Giornale di Fisica*, 15, 206, 1974. Some years later, Silvio Bergia (who first began actively collaborating with me in 1969 on the subject of elementary particle physics, then, as mentioned, on its criticism, and later on the foundations of quantum mechanics) and Paola Fantazzini, inspired by the two papers just mentioned, returned to the subject of Smeaton in order to show that he had played an important role in the attempts to derive the basic conservation laws describing collisions between two bodies. Silvio Bergia and Paola Fantazzini, "La descrizione dei fenomeni meccanici in termini energetici nell'opera di John Smeaton, Parte prima: Dalle ruote ad acqua ai teoremi dell'impulso e delle forze vive," *Giornale di Fisica*, Vol. XXII, n. 4, 1981; "La descrizione dei fenomeni meccanici in termini energetici nell'opera di John Smeaton, Parte seconda: Un modello per l'urto anelastico ed il suo controllo sperimentale," *Giornale di Fisica*, Vol.XXIII, N. 1, 1982.

[7] See, for instance, Luciana Castellina. "*Il Manifeto* and Italian communism," *New Left Review*, 151, May–June 1985, https://newleftreview.org/issues/i151/articles/luciana-castellina-il-manifesto-and-italian-communism

[8] I once heard a colleague of mine commenting with contempt to a group of students: "History is not a rigorous discipline; physics instead is rigorous."

when new courses on the history of physics were created in almost all the university physics departments in Italy. Of course, the approaches that were adopted by the various teachers were quite different, reflecting their personal lines of thought or the "school" in which they had been educated. In practice, this variety of approaches was a treasure. It was a recently born field in rapid evolution, for which there was no previous tradition, and it bordered on so many complementary aspects: scientific, historical, methodological, and philosophical.

Other substantial developments by historians of science moved quite rapidly. The group active at the University of Lecce (Arcangelo Rossi, Elisabetta Donini, and Tito Tonietti) organized a very remarkable initiative[9] from July 1–5, 1975. It originated as a cultural-political project and was supported principally by mathematical physicists (Gianni Jona Lasinio and others). Its general aim was the reinforcement of simultaneously theoretical and applicative themes that expressed a strong political and scientific engagement. This congress brought together many like-minded physicists and mathematicians for a series of challenging talks and lively discussions.[10] It was also an important occasion for discussion and confrontation.

The divergence from the "school of Geymonat" blew up publicly after the 1974 publication of the book *Attualità del Materialismo Dialettico* (Topicality of Dialectical Materialism)[11] by Geymonat and his most direct collaborators. A radically conflicting view was developed in 1976 by Marcello Cini and his pupils and collaborators in the collective volume *L'Ape e l'Architetto*[12] (The Bee and the Architect), whose title, by explicitly recalling the famous comparison of Marx, underlined their genuine "Marxian" views—as further confirmed by the subtitle, which made direct reference to "Scientific Paradigms and Historical Materialism." Albeit with less resonance, Arcangelo Rossi and I developed in the same year (1976) the methodological framework for a more systematic "historical materialistic" approach to natural sciences, conceived as an extension of Marx's analysis of economic science.[13] In order to develop such an

[9] Elisabetta Donini, Arcangelo Rossi, and Tito Tonietti, 1977, *Matematica e Fisica: Struttura e Ideologia*, Bari, De Donato.
[10] That many participants in the conference camped, with a deep sense of comradeship, in the pine grove which at that time flanked the Institute of Physics in Leece was a sign of the spirit and enthusiasm of those years.
[11] Enrico Bellone, Ludovico Geymonat, Giulio Giorello, and Silvano Tagliagambe, *Attualità del Materialismo Dialettico*, Roma, Editori Riuniti, 1974.
[12] Giovanni Ciccotti, Marcello Cini, Michelangelo De Maria, Giovanni Jona-Lasinio, Elisabetta Donini, and Dario Narducci, *L'Ape e l'Architetto. Paradigmi Scientifici e Materialismo Storico*, Milano, Feltrinelli, 1976 (reprinted in 2011).
[13] Angelo Baracca, and Arcangelo Rossi, *Marxismo e Scienze Naturali. Per una Storia Integrale delle Scienze*, Bari, De Donato, 1976.

analysis of the historical development of scientific conceptions in the context of a specific social economic formation, they adopted and extended the concept developed by the Italian philosopher Galvano Della Volpe (1895–1952) of "(historically) determined abstractions."

The contrast between this approach and the cited *Attualità del Materialismo Dialettico* of Geymont and his school could hardly have been more drastic, and deepened in the following developments. Here we will not follow the (undoubtedly relevant) contributions of the thriving and very active school of Geymonat any further, in particular of his most direct authoritative pupils, Enrico Bellone, Giulio Giorello, and Silvano Tagliagambe.

In the following years, I worked together with my students Roberto Livi and Stefano Ruffo, who had both recently graduated in physics, to apply the methodological approach formulated in the aforementioned book, *Marxismo e Scienze Naturali*, to a thorough analysis of the development of physics and chemistry in the context of the nineteenth century and its deep social and economic transformations. In a sense, this program was a continuation of the previous study on the birth of the energy concepts during the First Industrial Revolution of the eighteenth century. With a similar approach, we extended our analysis to the take-off of the Second Industrial Revolution at the end of the nineteenth century as a precursor to the genesis of quantum mechanics. In a first study,[14] accompanied by a wide anthology of original texts (mainly intended for didactic use or for non-specialized readers), we presented a first survey of the main scientific changes during the whole century. This text also provided testing ground for a more in-depth analysis of the scientific changes stemming from the 1848 revolutions and fully developing through the economic transformations triggered by the Second Industrial Revolution in last three decades of the century, which laid the basis for the so-called revolution in physics of the twentieth century.[15] This book is reproduced at the end of this preprint.

Unfortunately, the Faculty of Physics in Florence refused to institute a course on the history of physics; however, in part stimulated and encouraged by my students, I began in the early 1970s to tackle my course on statistical mechanics with a historical approach. Scientific development was integrated into the global historical context. I was becoming more and more convinced that the same formal developments are more comprehensible when they are framed by

[14] Angelo Baracca, and Roberto Livi, *Natura e Storia, Fisica e Sviluppo del Capitalismo nell'Ottocento*, Firenze, D'Anna, 1976.
[15] Angelo Baracca, Stefano Ruffo, and Artuto Russo, *Scienza e Industria 1848–1915, gli Sviluppi Scientifici Connessi alla Seconda Rivoluzione Industriale*, Bari, Laterza, 1979.

the relevant cultural and social changes of their time. This approach generated, with successive revisions, a critical textbook of statistical mechanics."[16]

By 1978, the national group of historians of science had matured to the point of needing a specific vehicle with which to expound and develop their research, collate other interesting contributions, and develop a discussion. With some effort, they succeeded in promoting the publication of the triannual journal *Testi e Contesti*, which printed nine issues before closing in 1981 due to economic difficulties.[17]

At this stage of development of their historical approach, the group of young historians of science (holding positions as diverse as could be) was ready to tackle the analysis of the twentieth-century revolution in physics, the conceptual root of their original dissatisfaction in their active research. It was known that a systematic program of research on the history of quantum physics had already started in the 1960s.[18] At the end of the 1970s, some members of the group of young Italian historians of physics in Rome and Lecce established a relationship with John Heilbron and Paul Forman. In 1979, they organized a conference in Lecce, "Physics and Society in the 1920s," on the growth of quantum mechanics,[19] in which the development of this theory both during the troubled years of the Weimar Republic and then its movement to and part in the new hegemonic role of the United States was analyzed in terms of the economic, social, and cultural contexts.[20]

The next development—chronologically and logically—was a more challenging and

---

[16] Angelo Baracca, *Manuale Critico di Meccanmica Statistica*, Catania, Culc, 1979.

[17] See Arcangelo Rossi, "L'esperienza di 'Testi e Contesti,'" *Pristem/Storia*, 27–28, "Il '68 e la Scienza in Italia," ed. Angelo Guerraggio, 2010, 87–96.

[18] Thomas S. Kuhn, John L. Heilbron, Paul Forman, and Lini Allen, *Sources for the History of Quantum Physics*, American Philosophical Society, Memoir 68, 1967, http://www.amphilsoc.org/guides/ahqp/.

[19] Michelangelo De Maria, Elisabetta Donini, Ester Fano, Paul Forman, John Heilbron, Robert Linhart, Robert Seidel, and Tito Tonietti, *Fisica e Società negli anni '20*, Milano, Clup-Clued, 1980: Proceedings of the Conference "The Growth of Quantum Mechanics in the 20's and the Cultural, Economic and Social Context of the Weimar Republic and the USA", held in Lecce, September 3–6, 1979.

[20] The titles of the talks at the conference were as follows: Paul Forman, "Kausalität, Anschaulichkeit and Individualität, or how cultural values prescribed the character and lessons ascribed to quantum mechanics;" Tito Tonietti, "Quantum mechanics in the mathematical context: changes in the point of view and some institutional aspects"; Ester Fano, "Capitalistic development in the 1920s: US hegemony and its relationship with German economy"; John L. Heilbron, "Physics in the United States immediately before quantum mechanics"; Elisabetta Donini, "Scientific aspects and historic context in the passage of quantum mechanics in the United States"; Robert Seidel, "Institutional aspects of the transmission of quantum mechanics to the United States"; Michelangelo De Maria, "Industrial restructuring and technological innovation in the 1920s in the US"; Robert Linhart, "Taylorism between the two wars: some problems"; Angelo Baracca, Roberto Livi, and Stefano Ruffo, "The restructuring of sciences between the two world wars"; Paul Forman, "Economic support to German physicists during the Weimar Republic, and the spectrum of their political positions"; Elisabetta Donini, "Quantum mechanics between Germany and the US."

comprehensive international conference on "The recasting of science between the two world wars," which took place first in Florence and then continued in Rome, with the participation of renowned specialists.[21] This conference was designed and prepared by the whole national group of historians of physics, and was organized by the groups of Florence and Rome. It was conceived as a strategic choice, both from a methodological point of view—the problem of the structure and contents of twentieth-century science could finally be tackled—and in terms of the growth and development of the group itself. In fact, it definitively marked the capability of the Italian group of historians of physics to interact and collaborate at an international level with the most qualified specialists and on a multidisciplinary level. The conference really constituted the peak of this collective project.

2. The peculiar approach and the contents of *Scienza e Industria, 1848–1915:* Connecting scientific changes to certain social economic transformations

The purpose of *Scienza e Industria* is to provide an accurate historical reconstruction of the process of increasing formalization, mathematization, and abstraction in science from the nineteenth century up to the early twentieth century. The original feature of the book (at least for its time) is that such a process is not merely interpreted as a natural evolution of the scientific approach towards a deeper treatment and understanding of natural phenomena. The presence of this "natural evolution" of science is obviously not excluded, but a more fruitful and substantial reconstruction is proposed. In line with Marx's historical materialistic approach, the material bases of production determine the other aspects of intellectual life (superstructure). In every historically determined social economic formation, the social structures and cultural approaches inherited from the past enter into contradiction, together with the social and productive relations, with the emergence of new social strata carrying new needs. In the reconstruction of the evolution of science discussed in *Scienza e Industria*, such an assumption is not adopted in a mechanical way as a direct cause-effect relation, but is rather articulated through a thorough analysis of the multiple interconnections between various levels and aspects of social life and relations: cultural trends, social ferments, class struggles, the emergence of new social

[21] The conference took place between June 28 and July 3, 1980, in Florence and Rome (the foreign participants spent the weekend as tourists), but it took a long time for the organizers to collect the papers and publish the proceedings, which was done by the group from Rome: Giovanni Battimelli, Michelangelo De Maria, and Arcangelo Rossi, *La Ristrutturazione delle Scienze tra la Due Guerre Mondiali*, 2 Volumes, 1984, La Goliardica Editrice Univesitaria, Roma.

components, the contradictions between the mode of production and changing social relations, the push for technical innovations, the consequent pressure exerted towards the renovation of scientific concepts and approaches, and changes in the social organization of science.

It should be remembered that, at the time the book was conceived (and particularly in the contemporary situation in Italy), the revolution of scientific teaching and the criticism of the dominant conception of science in the scientific community were among the main objectives of the young physicists. Highlighting a historical perspective, the connections between science and society, as opposed to the usual conception of the neutrality of science, carried a strong charge of opposition to the ideology and approach of the scientific establishment as well as links to the most advanced fights of the working class and to student protests.

Last but not least, the book outlined a novel approach to the teaching and popularization of the sciences, trying to overcome the growing gap (also called the gap between the two cultures) between the level of popular consciousness and the increasing specialization and formalization of science. In fact, it would be absurd and unrealistic—as well as useless—to pretend that regular, scientifically unlearned people should (and could) learn the formal contents of modern science. It would be very useful, however, and possible too, for them to grasp the ultimate purposes of scientific innovations as well as their social economic implications and consequences. Such lessons would have deep consequences for our lives and future.

3. Introductory considerations: Modern science and the First Industrial Revolution of the eighteenth century

Let us briefly summarize how the historical materialistic reconstruction of the book develops.

Modern science is a product of the Industrial Revolution. The needs of the emergent middle class in England led the new entrepreneurial strata to consider natural processes in a new light—namely, as productive forces. Machines were tools that could do *work*, a concept that was rigorously defined but also assumed a concrete social determination for the working-class generation that sold its labor force to produce economic value for the owners of the means of production. In the previously cited paper on the birth of the physical concepts of work and energy at the beginning of the First Industrial Revolution,[22] the technical and scientific

[22] Angelo Baracca and Riccardo Rigatti, "Aspetti dell'interazione tra scienza e tecnica durante la rivoluzione industriale inglese del XVIII° sec. in Inghilterra, 1ª Parte: La nascita dei concetti di lavoro ed energia." *Giornale di*

contributions of John Smeaton were discussed.[23] In an outstanding 1759 study on water wheels, Smeaton explicitly wrote:

> As I shall be obliged to make use of a term which has heretofore been the cause of disputation, I think it necessary to assign the sense in which I would be understood to use it; and in which I apprehend it is used by practical *Mechanics*.
>
> The word *Power*, as used in practical mechanicks, I apprehend to signify the exertion of strength, gravitation, impulse, or pressure, so as to produce motion: and by means of strength, gravitation, impulse, or pressure, compounded with motion, to be capable of producing an effect: and that no effect is properly mechanical, but what requires such a kind of power to produce it.
>
> The raising of a weight, relative to the height to which it can be raised in a given time, is the most proper measure of power; or, in other words, if the weight raised is multiplied by the height to which it can be raised in a given time, the product is the measure of the power raising it; and consequently, all those powers are equal, whose products, made by such multiplication, are equal: for if a power can raise twice the weight to the same height, or the same weight to twice the height, in the same time that another power can, the first power is double the second: and if a power can raise half the weight to double the height; or double the weight to half the height, in the same time that another can, those two powers are equal.[24]

Smeaton's rigorous empirical approach led him to correctly recognize the conceptual distinction and role of the modern concepts of kinetic, potential, and total mechanical energy.

The transference of English practical mechanics to the philosophy of the French Enlightenment in the wake of the 1789 French Revolution produced a generalization of Smeaton's conceptual approach in Lazare Carnot's treatment of every kind of mechanical engine, and the early mathematical definition of the physical quantities of potential, mgh, and kinetic energy, $\frac{1}{2}mv^2$ (in which the correct factor ½ probably made its first appearance).

This rigorous empirical approach was also the basis of the science of heat. Watt's innovative invention of the separate condenser[25] identified, for the first time, heat engines' operational need for a difference of temperature between two heat sources.

Like in the case of the theory of mechanical engines, the transference to French engineers

---

Fisica, 15, 144, 1974.

[23] John Smeaton, "An Experimental Enquiry concerning the Natural Powers of Water and Wind to Turn Mills, and Other Machines, Depending on a Circular Motion." *Philosophical Transactions* (1683–1775), 51 (1759–1760): 100–174.

[24] John Smeaton, "Experimental Enquiry," 105–106.

[25] Angelo Baracca and Riccardo Rigatti, "Aspetti dell'interazione tra scienza e tecnica durante la rivoluzione industriale inglese del XVIII° sec. in Inghilterra, 1ª Parte: La nascita dei concetti di lavoro ed energia," *Giornale di Fisica*, 15, 144, 1974.

generated the systematic generalization in Sadi Carnot's first theory of heat engines. In the context of French positivism, both Sadi Carnot and Fourier clearly acknowledged that the science of heat is conceptually independent from mechanics, and must be based on specific principles:

> But, whatever may be the range of mechanical theories, they do not apply to the effects of heat. These make up a special order of phenomena, which cannot be explained by the principles of motion and equilibrium.[26]
>
> Machines which do not receive their motion from heat […] can be studied even to their smallest details by the mechanical theory. […] A similar theory is evidently needed for heat-engines.[27]

Part 1: Science and bourgeois power, 1848–1873: Overcoming the phenomenological approach in science and the adoption of models

Positivism in the early nineteenth century

On the basis of these early studies, the starting point of *Scienza e Industria* was to methodologically identify, as a common essential feature of eighteenth and early nineteenth-century positivist physics and chemistry, the restriction of scientific elaboration to empirically defined quantities in order to guarantee the objectivity of the results and the explicit refusal of any concept which could not be empirically defined and verified. A typical example of this was the general refusal to adopt the distinction between atoms and molecules, although it had been anticipated in some form as early as 1811 by Amedeo Avogadro (1776–1856) and 1814 by André-Marie Ampère (1775–1836). In fact, although the hypothesis could have solved the contradictions of the atomic weights, the very idea of atoms was rejected because these entities were not experimentally observable.

This methodological assumption implied strong limitations on the possible results that could be attained. For instance, the true classification of organic compounds requires reference to the structure of molecules. Such an assumption was connected to the kind of technology of productive forces developed in the first half of the nineteenth century. At this stage of technical scientific development, technical innovations anticipated the development of science and

[26] Jean Baptiste Joseph Fourier, *Theorie Analytique de la Chaleur*, Paris, 1822, p. 2; Engl. transl., *The Analytical Theory of Heat*, London, 1878, p. 2.
[27] Sadi Carnot, *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu*, Paris, 1824; Engl. transl., *Reflections on the Motive Power of Heat*, New York, John Wiley, 1897, p. 44.

determined its conceptual frame. In other words, this phenomenological approach, though it allowed great scientific progress, restricted the empirical horizon to the level reached by productive forces and technologies, and prevented the possibility of reaching radically innovative concepts and new fields of knowledge.

The revolutions of 1848: New social subjects burst onto the scene

After the 1848 revolutions on the European continent, the entrepreneurial middle class extended its control over economic development. Its new demands entered into contradiction with the previous level of development of productive forces. In particular, this new entrepreneurial middle class grew in the countries of central Europe that had remained on the sidelines of the impressive English industrial development that had followed the First Industrial Revolution. The competition with the century-old British industrial giant required the search for new technical solutions and new strategies for a more systematic and effective search for innovations, especially in central Europe, where the new middle class was particularly resourceful. During the first two decades after the mid-century, however, the search for deep innovations was still based on the accelerating pace of empirical inventions, which had a major impact on early nineteenth-century technologies, although changes were increasingly guided by more elaborated scientific criteria. But only a radical methodological change to the basic approach to science could allow for the systematic search for completely new scientific contents. In fact, the mid-century was a turning point in this respect, since the previous refusal of any concept that went beyond experience was almost abruptly abandoned, and the usefulness of conceptual and mathematical models was acknowledged as the most fruitful approach for reaching completely new scientific conceptions.

The introduction of models in physics and chemistry in the 1850s

Starting from the mid-1850s, mathematical models based on non-observable entities, which had previously never been considered, began to be adopted as useful tools for the prediction of new properties, or the discovery of new phenomena or empirical facts. Stephen Brush called the period the "second scientific revolution."[28]

[28] S. G. Brush, *The Kind of Motion We Call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century* (2 Vols.), Amsterdam, North Holland, 1976, Vol. 1, pp. 35–51.

The revolution began with the kinetic theory of gases. In 1856, the German chemist and physicist August Karl Krönig (1822–1879) deduced Boyle's law that assumes gas is composed of extremely small spherical particles that move randomly. The elastic collisions of the particles against the walls of their containment are responsible for the gas pressure. In his over-simplified model, Krönig assumed that one-third of the particles move respectively along each orthogonal direction. The publication of Krönig's paper compelled Rudolf Clausius (1822–1888) to publish an analogous model the following year, which was just a little more mathematically elaborate (an integral on all angular directions). Clausius qualitatively reasoned on a comparison of the relatively long paths of the molecules between two subsequent collisions (meaning free path) and the short average distance between them. Clausius's paper caught the attention of Christophorous Buys Ballot (1817–1890), who then wrote to Clausius; Ballot wondered why the model disregarded the collisions between the molecules. In turn, this provoked Clausius into performing a calculation of the mean free path, which allowed him to obtain the first new result from the model, namely an expression for the coefficient of viscosity. The succession of these papers shows how the kinetic model was gradually adopted by physicists at that time. In fact, barely ten years earlier, in 1845, a similar paper by John James Waterston (1811–1883) was rejected by the Royal Society and was finally only published years after his death.[29]

The use of mathematical models based on fluids produced results that were no less interesting. George Stokes (1819–1903) developed the mathematical theory of physical optics by identifying light with waves propagating in a highly elastic fluid, the "luminiferous aether."[30] An analogous treatment was introduced by Lord Kelvin (1824–1907) and fully implemented by James Clerk Maxwell (1831–1879) for electric and magnetic phenomena. This method was a development of Faraday's early qualitative approach in terms of contact actions. It stood in direct contrast with the traditional approach—introduced by Newton but adopted mainly by the French school—which was based on forces acting at a distance. For instance, Maxwell wrote:

> Let us now suppose that the phenomena of magnetism depend on the existence of a tension in the direction of the lines of force, combined with a hydrostatic force […] The explanation which most readily occurs to my mind is that the excess of pressure in the equatorial direction arises from the centrifugal force of vortices or eddies in the medium

[29] J. J. Waterston, "On the physics of media that are composed of free and perfectly elastic molecules in a state of motion," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A, vol. 183 (1892), pp. 1–79.
[30] G. G. Stokes, "On the aberration of light," *Phil. Mag.*, *27*, 1845, p. 9.

> having their axes in directions parallel to the lines of force.[31]

On these grounds, Maxwell developed a complex mathematical treatment, identifying electric and magnetic actions with the states of pressure, stress, or torque inside the hypothetical fluid (vortices materially represented the vector operator "curl"). As Maxwell stated in 1855:

> In order to obtain physical ideas without adopting a physical theory we must make ourselves familiar with the existence of physical analogies. By a physical analogy I mean that partial similarity between the laws of one science and those of another which makes each of them illustrate the other.[32]

Over the course of the next couple of decades, Maxwell developed his idea and arrived at a unified theory of magnetic and electric phenomena, i.e., the general theory of electromagnetism.[33] It should be noted that the predictive power of this model-physics, which allowed one to predict the existence of electromagnetic waves—a discovery that was to revolutionize technology and social life—would have been problematic, to say the least, if such a result were reached on a purely empirical basis.

That the times were ripe for a methodological renovation in the natural sciences was finally demonstrated by the analogous choice that was made in chemistry, by which in 1859 the previous refusal of the atomic theory was quite suddenly turned upside down. At the international congress of chemists in Karlsruhe, the Italian chemist Stanislao Cannizzaro (1826–1910) proposed the previously rejected Avogadro hypothesis.[34] This time, the atomic-molecular model was accepted. This model, proposed a new basis for chemistry and allowed a decisive leap forward, with which chemistry acquired true predictive power. In the first place, models of the internal structure of complex molecules were systematically developed, connecting the macroscopic properties to the spatial disposition of atoms or to specific atomic groups in the molecule. This allowed operations of true "molecular engineering," namely the design of new molecules with specific chemical properties connected to specific groups of atoms, and the search for more efficient industrial processes of synthesis. One of the fundamental results was

---

[31] J. C. Maxwell, "On physical lines of force," *Phil. Mag.*, *21*, 1861, pp. 161–175, 281–291; reprinted in *The Scientific Papers of J.C. Maxwell*, Vol. I, pp. 451–513, Cambridge (England), Cambridge University Press, 1890; reprinted, New York, Dover, 1952.
[32] J. C. Maxwell, "On Faraday's lines of force," *Philosophical Magazine*, Series 4, 11, pp. 404–405, 1855.
[33] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 1873, 2 vols., third ed. New York: Dover., 1954.
[34] S. Cannizzaro, "Sunto di un corso di filosofia chimica, fatto nella R. Università di Genova," *Il Nuovo Cimento*, *VII*, 1865, pp. 321–66; Engl. transl. in H. M. Leicester and H. S. Klickstein, *A Source Book in Chemistry 1400–1900*, McGraw Hill, New York, 1962, pp. 407–417.

the hexagonal model of the benzene molecule proposed by August Kekulé (1829–1896) in 1865,[35] which became the basis for the modern and effective classification of organic compounds.

Another fundamental advance made possible by the new conception was chemical equilibrium, which emerged from the complexity of the new chemical and technological processes. In the past, only the simplest chemical processes had been used, those that proceeded until the exhaustion of one of the reactants. But when more complex reactions came into use, in particular organic ones, it was observed that they resulted in chemical equilibrium. Often, they did not even occur in normal thermodynamic conditions, but required exceptional values for pressure and temperature. In 1864, the Norwegians Guldberg (1836–1902) and Waage (1833–1900) elaborated upon this concept[36] in terms that anticipated those of kinetic theory and even Boltzmann's approach. Apart from the rather obscure terms they used, their hypothesis was that the velocities in the two opposing directions of an $A+B \Leftrightarrow C+D$ chemical reaction are proportional to the product of the concentrations of the molecules that collide, that is, respectively $k_1 \cdot [A][B]$, and $k_2 \cdot [C][D]$, where k_1 and k_2 are two constants (depending on the kinds of molecules and on the values of the thermodynamic parameters, see below). Chemical equilibrium occurs when the two velocities are equal, whence the law for chemical equilibrium (*mass action*) derives:

$$\frac{[C][D]}{[A][B]} = \frac{k_1}{k_2} = \mathrm{K_{eq}} \qquad (1)$$

In fact, Guldberg and Waage's approach is conceptually equivalent to Boltzmann's slightly posterior *Stosszahlansatz* ("hypothesis of molecular chaos") of 1872,[37] namely that the number $n_{u,v}$ of collisions between molecules having respectively velocities $\vec{v}$ and $\vec{u}$ is proportional to the product of their respective numbers:

[35] A. Kekulé, *Bulletin de la Société Chimique*, t. III, 1865, p. 98; *Annalen der Chemie und Pharmacie*, *137*, 1865, pp. 129–196; partial Engl. transl. in Leicester and Klickstein, *Source Book in Chemistry*, 1962, pp. 421–425.
[36] C. M. Guldberg and P. Waage, *Forhandlinger i Videnskabs-Selskabet i Christiana* (Norway), 1864, pp. 35–40, 111–120.
[37] Ludwig Boltzmann, "Weitere Studien über des Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen", *Sitzungsberichte Akad. Wiss.*, Wien, Part II, 1872, 66: 275–370; Engl. transl. in S. G. Brush, *Kinetic Theory* (3 vols.), Vol. I: *The Nature of Gases and Heat,* Pergamon Press, 1865, 88–175.

$$n_{\mathrm{u,v}} \propto f(\vec{r},\vec{v},\mathrm{t}) \cdot f(\vec{r},\vec{u},\mathrm{t}) \tag{2}$$

Boltzmann's proof of Maxwell's velocity distribution derived therefore from a procedure formally analogous to (1), corresponding in the case of the gas to the condition that the number of direct and inverse collisions are the same.

Part 2: The Second Industrial Revolution

The take-off in Germany

The most astounding developments occurred in Germany—principally in Prussia—while the country was still divided into various states. These developments established the conditions for the Second Industrial Revolution, which is generally accepted to have begun in 1870 when the German Confederation routed the French power of Napoleon III and German unification was declared in 1871.

Actually, the economic initiative of the German entrepreneurial class started around the 1830s (Krupp's ironworks grew out of a pioneering steel foundry in Essen in 1810). German development benefited from a very advanced educational system, which could satisfy the growing need for both a working class with basic skills as well as a wide category of specialized and trained scientists and technicians (Chapter 5 of *Scienza e Industria* is dedicated to this aspect).[38] Besides the universities, which radically modernized their laboratories and teaching methods, there was a system of polytechnics (*Technische Hochschulen*) unknown in other countries, which prepared highly qualified technicians with a university training in applied research. At both levels, strict collaboration with the main firms provided a close link between the academic milieus and the concrete problems of production and technical innovation.[39]

[38] See, for instance, a classical study by W. H. Lexis, *A General View of the History and Organization of Public Education in the German Empire*, Berlin, 1904; W. H. Lexis, ed., *Das Unterrichtswesen im Deutschen Reich: Aus Anlass der Weltausstellung in St. Louis*, Vol. 1, *Die Universitäten in Duetschen Reich*; Vol. 4, *Das Technischen Hochschulen im Deutschen Reich*, Berlin, 1904. More recent studies are: R. S. Turner. "The growth of professorial research in Prussia, 1818 to 1848." *Historical Studies in the Physical Sciences,* 3(1971): 137–182; C. E. McClelland, *State, Society, and University in Germany, 1700–1914*, Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
[39] Karl-Heinz Manegold, *Universität, Technische Hochschule und Industrie: Ein Beitrag zur Emanzipation der Technik im 19. Jahrhundert unter besonderer Berücksichtigung der Bestrebungen Felix Kleins*, Duncker & Humblot, Berlin, 1970.

The driving role of German chemistry

One of the most original theses of *Scienza e Industria* was probably the driving role of chemistry and the chemical industry not only for German development or the start of the Second Industrial Revolution but also the general renewal of scientific methodology.

The German schools of chemistry became the most advanced in the world, and those chemists who wanted a thorough training went to study in Germany. Not surprisingly, the best source of information regarding the German educational system is given by the *Reports of the Parliamentary Commissions*, which were appointed in these decades to investigate the reasons for the worrying decline of British education and to suggest solutions. In 1867, the chemist Roscoe declared in one report, "In Cambridge there are not the means to prepare, for instance, a chemist [. …] [A] person who thinks to distinguish himself in chemical science would not remain satisfied with the preparation that he could get in Cambridge, and would go abroad for this."[40]

Chemists and chemical engineers were widely employed in the German chemical industry, and sometimes given executive responsibilities in directing research. The pressure for technological and scientific innovation was a powerful driving force. The chemical industry (especially organic chemistry, and in particular the dye industry, which at the end of the nineteenth century accounted for 85–90% of the world output of dyes) and the electric industry were the leading German sectors.

The recently established modern chemical firms (Hoechst, 1863; Bayer, 1863; BASF, 1865; Agfa, 1867) grew very rapidly in these decades, built up huge research laboratories, and developed intensive scientific research. In Germany, in fact, the chemical industry adopted its modern, science-based structure, based on programs of team investigation and centered in the research laboratory.[41] The percentage of workers with a university degree in the principal German chemical firms at the end of the century was comparable with today's figures (in 1900, the German chemical industry employed 3,500 chemists out of a total of 80,000 employees, 40% of whom worked in plants with more than 200 employees). In 1900, BASF employed 148 chemists out of 6500 workers, Hoechst 120 chemists and 36 engineers out of almost 4000, Bayer

[40] Parliamentary Papers, (1867–68) *Report of the selected committee appointed to enquire the provisions for giving instructions in theoretical and applied sciences to industrial classes; report from the selected committee on scientific instruction*, London, vol. XV, 1867–68, p. 286.
[41] P. M. Hohenberg, *Chemicals in Western Europe 1850–1914*, Rand McNally & Co., Chicago, 1967.

145 chemists and 27 engineers. The laboratory was the brain behind the planning and the development of the chemical firm, as a British observer remarked in 1909:

> Control of big chemical plants in Germany is to a great extent in the hands of chemists; it is relatively unusual to find persons skilled only from the financial or commercial point of view in responsibility places of direction. […] [O]ne of the most peculiar features is the large amount of money invested every year for scientific purposes. Researchers are used with the purpose of discovering new products and improving the existent fabrication methods. These men proceed from the universities and the polytechnic schools.[42]

Strict collaboration and interchange were kept with the leading professors of the universities and the polytechnic schools. At the time, BASF explicitly ascribed great importance to maintaining personal relationships with scientists in the interests of useful research. Agfa was established by two chemists, Martius and Mendelssohn-Bartholdy. In 1868, BASF appointed the chemist H. Caro to direct its laboratory. Caro kept up direct contacts with the most qualified chemists in the universities. A similar role was played by Carl Duisberg in Bayer. On the contrary, the situation was completely different in Britain. The chemist Frankland replied to an inquiry commission in 1867:

> I had the occasion to visit many chemical industries in Lancashire, which I had not visited in the last 11 years, and I was struck to see that the processes in use at that time are still in use, and exactly in the same way. There are many attempts of inventions, but in general they fail; so that if one gets a new patent, nobody believes in it; and with reason, since it is probable that it has no value. […] There is in this country a great waste of intellectual work and time.[43]

In 1845, the Royal College of Chemistry of London appointed a German chemist named A. W. Hofmann as its director. When he resigned, the previously mentioned British chemist Roscoe declared to the commission, "I think that Prof. Hofmann went back to Germany only because he has understood that it is impossible here to build a true school of science."[44]

Particularly advanced technical scientific developments happened in the German organic chemical industry:

> […] organic chemistry had helped to lower the barriers between pure and applied chemistry by a remarkably fruitful cooperation between the German academic and industrial chemists who built up the industry of coal-tar products [….] Germany had by

[42] M. Baron, *Chemical Industry on the Continent*, Manchester University Press, 1909, p. 43.
[43] Parliamentary Papers, 271.
[44] Ibid., 284.

> the early 1880s gained world leadership in most areas of pure and applied organic chemistry.[45]

The most advanced sector was that of synthetic dyes. The first artificial dye had been obtained in 1856 by Perkin, one of Hoffmann's assistants in London. Until 1869, small dye plants had only been established in France and Britain. In that year, Graebe and Liebermann of the Berlin Polytechnic successfully produced alizarin. Their process was not industrially viable, but in collaboration with Caro's laboratory in BASF the patent for an industrial process was obtained just a few days before a similar application by Perkin. This allowed BASF to become one of the biggest global players in this sector. Similar developments happened in the whole of the German chemical industry, in particular in the five main research-intensive dye firms (BASF, Bayer, Hoechst, Agfa, and Cassella). In 1880, A. Baeyer, after many attempts, obtained synthetic indigo. Caro established with him a research agreement that took 17 years to find an industrial process, entailing the expenditure of one million pounds, the efforts of dozens of technicians and researchers. Despite these difficulties, the research yielded several collateral processes, and thus the "advent of synthetic indigo opened the way to reducing competition and cutting the costs of research in many other dyes."[46] At the end of the century, Germany accounted for 75 % of the world production of dyes, with a value that grew from 1.2 million pounds in 1874 to 6 million in 1898.[47]

Another notable technical scientific undertaking was the so-called "fixation of nitrogen" (or ammonia synthesis), carried out in 1913 by Fritz Haber (1868–1934) of the Karlsruhe polytechnic and the BASF chemist Carl Bosch (1874–1940). Nitrogen is a common component of the atmosphere in its molecular form, N_2, which can be easily separated by fractional distillation (e.g. for refrigeration techniques), but is used as a compound in fertilizers and explosives. At the end of the nineteenth century, the only available source of nitrogenous compounds was guano (bird dung) from Chile, which besides being subject to depletion, was moreover subject to the British control of the seas; thus "Germany's growing dependence on imports of certain key inorganic resources also became a matter of concern to many chemists in

[45] A. J. Johnson, *The Kaiser's Chemists, Science and Modernization in Imperial Germany*, The University of North Carolina Press, Chapel Hill and London, 1990, p. 25.
[46] Ibid., p. 34.
[47] L.F. Haber, *The Chemical Industry During the Nineteenth Century: A Study of the Economic Aspects of Applied Chemistry in Europe and North America.* Clarendon Press, Oxford, 1958, 126.

Germany around the turn of the century."[48]

A compound of nitrogen, NO, can be produced by an electric arc, but this process is too expensive for industrial production. The reaction $3H_2 + N_2 \leftrightarrow 2NH_3$ does not proceed at ordinary temperatures and pressures, so the basic problem consisted in determining the dependence of the chemical equilibrium of this reaction on thermodynamic conditions. The progress in physical chemistry that we will discuss in the next section was essential in order to establish that, being an exothermic process with four initial and two final molecules, ammonia can be obtained at a relatively low temperature but only under very high pressure. After numerous attempts, Haber concluded in 1905 that such a process was not industrially feasible. In 1906, in his investigations on the third principle of thermodynamics (see below), Walter Nernst critically reviewed Haber's results. Some years later, the latter reconsidered the problem and found the solution in collaboration with Bosch (Nobel Prize, 1932), solving enormous technical problems, including the identification of a suitable catalyst, the manufacture of very high pressure-resistant equipment (Krupp provided steel converters in a single block), and the standardization of the process. A huge plant was established at Oppau, which produced 8,700 tons of ammonia per year—raised to 60,000 during the war, at that point employing 5,000 workers, 40 chemists, 60 engineers, and 500 technicians—and a second plant in Leuna. This process for ammonia synthesis allowed Germany to continue to resist for years during the First World War despite being completely surrounded, since it could synthesize its own explosives and fertilizers. When an Allied commission inspected the Oppau plant for ammonia production in 1919, it could ascertain the great technical progress that had been made. Ammonia was not the only case: Germany had become able to replace expensive, naturally occurring substances, which otherwise would have had to have been imported, with synthetics and artificially produced ones based on cheaper, domestically available substances.

In connection with this, it is worth recalling Haber's direct involvement in war research. As the director of the Kaiser Wilhelm Institute for Physical Chemistry and Electrochemistry in Berlin, he was the organizer and the true father of the German manufacture and (according to international law, illegal) use of chemical weapons (at Ypres in 1915),[49] a role that he affirmed in

[48] Johnson, *Kaiser's Chemists*, 39.
[49] Bretislav Friedrich and Jeremiah James. "From Berlin-Dahlem to the Fronts of World War I: The Role of Fritz Haber and his Kaiser Wilhelm Institute in German Chemical Warfare." In *One Hundred Years of Chemical Warfare: Research, Deployment, Consequences,* ed. B. Friedrich, D. Hoffmann, J. Renn, F. Schmaltz, M. Wolf, 25–

his Nobel Lecture (1918). Nernst too, who had been rejected from the army when he was young, enlisted as a volunteer when the war broke out, and was called as a technical advisor to the Supreme Army Command (*Oberste Heeresleitung*), where he devoted himself to chemical warfare.

Competition with the British industry

Chemistry was only one case that we discuss in some detail for its relevance in transforming the scientific approach (see below, Part 3). There was also deep technological innovation—the true means by which Germany could compete with Great Britain but could also overtake it, both in the more advanced technical fields as well as in fundamental and applied research. For instance, new techniques were introduced for steel production (Bessemer, Siemens, Gilchrist-Thomas). Unlike British industry—which had already created a massive but rather rigid structure that proved to be quite difficult to reorganize over the course of the previous century—the German steel industry was essentially built on the basis of these new technologies. At the beginning of the twentieth century, the average size of the German steelworks was about four times that of the British ones, and the overall German iron and steel production overtook that of Britain. Something similar happened in soda production when Solvay introduced a new and much more efficient method for its synthesis. British industry, based on the old Leblanc process, had reached a monopoly on world soda production, but it was not flexible enough to respond quickly to the new process, trying instead to improve the old one as much as possible. Ultimately, it collapsed. The emerging German soda industry, on the contrary, adapted to the new process and outstripped British production within a few decades, becoming the main world producer.

In the course of these developments, the awareness grew that leaving the process of innovation to almost haphazard initiatives or to the ingenuity of inventors was becoming inadequate. Some kind of guide to technical and industrial innovation was needed, and it could only be provided by scientific research—that is, if the latter could move past the substantially empirical approach that had strongly limited the possibility of reaching new results or discovering new processes. Obviously, such a change did not result from a conscious decision, but was instead a response to a new spirit of inquiry and investigation into natural phenomena that broke with traditional methods and reflected the increasing involvement of science and

44. Springer: Springer Open, 2017: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-51664-6_3.

technology in new social and economic developments. As it has been acknowledged:

> though the pioneers in these new fields had been technologists-scientists of Scotland and England in the period of industrial revolution and those of France in the period of French revolution, the systematic scientific researches in these new fields were commenced by German scientists in the 19th century. The term 'Physics' (*Physik*) itself was introduced during the German university reformation in the early 19th century.[50]

Part 3: Science and the Second Industrial Revolution

In the third part of *Scienza e Industria*, the deep scientific transformations at the turn of the nineteenth century and the roots of the twentieth-century revolution in physics are discussed. The focus of the interpretation is the demands made of chemists, particularly in Germany, during the last decades of the nineteenth century. There, chemists were pressured to meet the urgent demand for new processes and products and had to contend with increasingly complex problems. The innovation required to face such challenges anticipated the turn in physics that served as a basis for the revolution in physics of the early twentieth century. However, the situation was very different for physics and chemistry.

The controversies among physicists on the role of theories and mechanics

The last decades of the nineteenth century were characterized among physicists by harsh debates and controversies. The true nature of these discussions concerned the mechanistic formulation and interpretation of models and theories. The chemists, on the contrary, did not deal with such controversies, since they quickly realized that the complexity of the problems that they dealt with decidedly could not be reduced to a mechanistic approach.

The problems addressed by the physicists were soon paradoxical. The first one was connected to kinetic theory—namely, the *reversibility paradox*. The Boltzmann equation was based on molecular collisions, and was therefore interpreted as a mechanical equation. However, since mechanics is reversible, the derivation of irreversible behavior from such an equation appeared to be inconsistent (Loschmidt paradox). Boltzmann's answer to this criticism was immediate; he introduced the fundamental concept of probability in the microscopic interpretation of thermodynamics. It assumes the probability of a macroscopic state is the number of distinct microscopic states compatible with it. Using this theory, Bolzmann obtained a

[50] Christa Jungnickel, and Russell McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, Vol. 1, University of Chicago Press 1986, Chapter 1.

probabilistic definition of entropy, with the state of equilibrium derived as the most probable one:

> One could even calculate, from the relative number of the different state distributions, their probabilities, which might lead to an interesting method for the calculation of thermal equilibrium. […] Loschmidt's theorem seems to me of the greatest importance, since it shows how intimately connected are the second law and probability theory, whereas the first law is independent of it.[51]

Maxwell had already moved in this direction, with the argument of the so-called "Maxwell demon," which he exposed in 1867 in a letter to Tait.[52] Maxwell's argument led him to write Lord Kelvin in 1870, "The second law of thermodynamics has the same degree of truth of the proposition that if one throws a glass of water into the sea, he cannot extract the same glass of water."[53]

The substance of Boltzmann's answer is well known and is the foundation of statistical mechanics, yet he was never able to fully elaborate upon consequences of this approach. Because he never expounded on his response, Boltzmann remains only a transitional figure in our history. Boltzmann's basic step was the distinction between the macroscopic and the microscopic state of the system, assuming as a definition of probability of a macroscopic state the number of distinct microscopic states W

$$\mathrm{W}=\mathrm{N}!/\prod n_i\,! \tag{3}$$

N being the total number of particles in the gas, and n_i their average number in each cell of finite volume. On this basis, Boltzmann demonstrated that the equilibrium distribution (namely, Maxwell's distribution of velocities) derives from purely probabilistic considerations, without the need of any mechanical argument, as the most probable distribution, while entropy is defined as

$$\mathrm{S}=\mathrm{k}\ln W. \tag{4}$$

> The initial state of the system will be, in the majority of cases, a state of very small probability and the system will tend towards more probable states, till when it reaches the most probable state, namely the state of thermodynamic equilibrium. If we apply this to the second law of thermodynamics, we will be able to identify the magnitude

[51] Ludwig Boltzmann, "Über die Bezeilung eines allgemeine Mechanischen Satzes zum zweiten Hauptsatze Wärmetheorie," *Sitzungsberichte Akad. Wiss.*, Wien, Part II, *75*, 1877, pp. 67–73; Engl. transl. in S. G. Brush, *Kinetic Theory*, Vol. II, *Irreversible Processes*, Pergamon Press, 1966, pp. 192–93.
[52] Reported in G. G. Knott, *Life and Scientific Works of P. G. Tait*, Cambridge, 1982, p. 213.
[53] Reported in R. J. Strutt, *Life of J.W. Strutt, Third Baron Rayleigh*, Reprinted Madison, Wisconsin, 1968, p. 47.

usually called entropy with the probability of the corresponding state.[54]

These concepts marked the border between kinetic theory and statistical mechanics, although Boltzmann remained undecided and substantially limited by a residual mechanistic view.

Twenty years later, one further objection was raised against Boltzmann's theory, known as the "recurrence paradox," which was put forward by E. Zermelo, a young assistant of Planck.[55] This circumstance further depressed Boltzmann, who was aware that behind this criticism lay the negative attitude of Planck himself to the kinetic approach, and commented with sorrowful terms in his 1898 Introduction to the second volume of his *Lectures on Gas Theory*, "I am conscious of being only an individual struggling weakly against the stream of time."[56] Even this paradox was rooted in the claim of a mechanical interpretation of irreversibility. It was based on a theorem of mechanics demonstrated by Poincaré, who had shown that a (bound) mechanical system has to return to a state arbitrarily close to the initial one over a sufficiently long period of time. Boltzmann, upset and depressed by this criticism, retorted that his previous considerations had not been understood, and reaffirmed that the evolution of the system towards equilibrium is a probabilistic process. Nevertheless, his reply was essentially based on mechanics, since he evaluated that the "recurrence time" for a macroscopic system is tremendously long, much more than the life of the universe: "this is practically equivalent to *never*."[57] It is telling, however, that Boltzmann seemed to miss the crucial point that he himself had introduced, namely that Poincaré's theorem concerns the microscopic state of the system and has nothing to do with the macroscopic one, which is defined in terms of an ensemble of microscopic states. Such a failure betrays, in my opinion, the fact that Boltzmann had not yet overcome a fundamentally mechanistic view.

One could remark that the "phenomenologists," like Wilhelm Ostwald (1853–1932) and mainly Ernst Mach (1838–1916), had their work cut out for them in insisting on their anti-mechanistic polemic.

To summarize, these "paradoxes" of kinetic theory did not in any way reflect a contradiction

---

[54] Ludwig Boltzmann, "Über die Bezeilung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlich keitsrechnung respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht," *Wiener Berichte*, *75*, 62, and *76*, 1877, pp. 373–453.
[55] Ernst Zermelo, "Über einen Satz der Dynamik und die Mechanische Wärmtheorie," *Annalen der Physik*, *57*, 485–494; reprinted in S. G. Brush, *Kinetic Theory*, op. cit., *Irreversible Processes*, 1966, pp. 208–217.
[56] Ludwig Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 volumes, J.A. Barth, Leipzig, 1896–97; Engl. transl. in S. G. Brush, *Lectures on Gas Theory*, University of California Press, 1964, p. 216.
[57] Boltzmann, *Lectures on Gas Theory*, 444.

between mechanics and thermodynamic irreversibility, but stemmed from a lack of distinction between the macroscopic and the microscopic levels of description of the system; the final view of statistical mechanics would, in fact, reveal that mechanics and thermodynamics are two independent theories, which deal with different and complementary levels of description of the system.

But contradictions with respect to mechanics arose even in electromagnetic theory, as the latter was formulated on the basis of the electromagnetic aether, conceived as a classical fluid (one generally known as the paradox commonly called the "aether wind").

Ultimately, the clash between the innovative theories developed in the last decades of the century and the opposing points of view of the "phenomenologists," which centered on these contradictions, completely absorbed physicists in the last decades of the nineteenth century. In substance, the mechanistic philosophy strongly limited the potential for theoretical physics to reach completely new concepts and results, and the anti-mechanistic polemics deeply conditioned the possible developments.

Some decades later, Planck recalled the situation in German theoretical physics at the end of the nineteenth century and the subsequent change:

> At that time, all physicists were probably of the opinion that the future development of theoretical physics would have had as its essential aim the application of the above-mentioned principles [Hamilton's least action, conservation of energy, and the second principle of thermodynamics], and nobody thought that these basic pillars of science would soon be joined by completely different ones, independent of them and equal to them. […] [A]part from the detailed execution, theoretical physics toward the end of the last century presented the aspect of an imposing, self-contained, and consolidated structure. […] One may easily understand that a physical theory cannot transform its content by itself, and indeed it will oppose any transformation all the more strongly, the more complete and comprehensive it is. […] Therefore, the intervention of strong external forces [and] incontestable results of experimental research were necessary, which forced certain theoretical principles to be abandoned that until then had been generally accepted as universally valid, and with this a fundamental revision of the whole edifice of theoretical physics.[58]

[58] "Zu jener Zeit war wohl jeder Physiker der Meinung, daß die zukünftige Entwicklung der theoretischen Physik im wesentlichen die Durchführung der genannten Prinzipien zum Ziele haben würde, und niemand ahnte, daß zu diesen Grundpfeilern der Wissenschaft sich binnen kurzem noch ganz andere, von ihnen unabhängige und ihnen ebenbürtige gesellen würden. […] Wenn so, von der Durchführung im einzelnen abgesehen, die theoretische Physik gegen Ende des vorigen Jahrhunderts den Anblick eines imposanten, in sich geschlossenen und gefestigten Baues gewahrte. […] Es versteht sich, daß eine physikalische Theorie ihren Inhalt nicht von sich selber aus umbilden kann, ja daß sie sich einer jeden Erweiterung um so starker widersetzt, je vollständiger und umfassender sie ist. […] Darum bedurfte es des Eingreifens starker Kräfte von außen, unanfechtbarer Ergebnisse der experimentellen

The chemists beyond mechanicism and reductionism

We are now in a position to understand why chemists, mainly in Germany, were absent from the disputes on fundamental and methodological issues at the end of the century. This was not a sign of backwardness. On the contrary, they introduced a fundamental methodological turn that, for the first time, enabled them to overcome the mechanistic approach and turned out to be of the greatest importance for the revolution in physics at the beginning of the twentieth century. The chemists tackled problems of an unusual complexity and great practical and economic relevance, and the urgency with which quick and efficient solutions were demanded subjected these chemists to very strong direct and indirect pressure.

We have discussed, for instance, the extreme relevance of the problem of determining chemical equilibrium for the German chemical industry. What was the situation after Guldberg and Waage's paper of 1864? We have noted the similarity of their approach to Boltzmann's *Stosszahlansatz*, eq. (2). Such an approach, based on molecular collisions, without a doubt achieved outstanding results in the kinetic theory of gases and the interpretation of irreversibility, but it could hardly have had any chance of practical success in the calculation of equilibrium, even for the simplest chemical reaction. For instance, even a "simple" reaction such as $2H_2+O_2 \leftrightarrow 2H_2O$ is a very complex process, which never results from the simultaneous collision of three molecules, but rather from chains of binary dissociations and recombination that moreover differ according to thermodynamic conditions.[59] Therefore, whatever attempt to perform explicit calculations based on the kinetic-mechanistic method could not have any hope of success.

Faced with such complex problems, however, the position of chemists lent them a great advantage, since they were not bound to any rigid methodological rule and had to satisfy, above all, a practical criterion of efficiency and speed in solving problems and finding viable results. It seems quite natural, in this respect, that thermodynamics offered a much more flexible context than mechanics in the study of complex systems composed of a very large number of particles that undergo complex processes. Thermodynamics is in fact a set of phenomenological laws

---

Forschung, die zu einer Preisgabe gewisser, bis dahin allgemein als richtig angenommener theoretischen Sätze und damit zu einer gründlichen Revision des ganzen theoretischen Lehrgebäudes zwangen." Max Planck, "Theoretische Physik," in *Schmidt-Ott Festschrift: Aus 50 Jahren deutscher Wissenschaft*, de Gruyter, Berlin, 1930, pp. 300–309, 300–301. Translation by the author.

[59] For instance, at 600° C the reaction proceeds through a chain of binary collisions leading to partial dissociations and associations: $H_2 \rightarrow H+H$, $H+O_2 \rightarrow OH+O$, $O+H_2 \rightarrow OH+H$, $OH+H_2 \rightarrow H_2O+H$.

compatible with different models of the structure of the system; moreover, the thermodynamic state functions do not depend on the specific behavior of a transformation, but only on the initial and final states. For a chemical reaction, they depend on the concentrations and thermodynamic conditions of the reactants and the products, but not on the intermediate steps of the reaction.

In fact, it does not appear that the chemists further developed Guldberg and Waage's approach, nor that they had disputes of the kind that bothered the physicists; they instead refined and applied the concepts of theoretical thermodynamics as a part of chemical physics. Of particular importance were the concepts of free energy, a set of thermodynamic state functions whose minimum value directly corresponds to thermodynamic equilibrium in specific thermodynamic conditions. In 1876, the American physical-chemist Willard Gibbs (1839–1903) (who would formulate statistical mechanics in 1902) published a fundamental paper on the equilibrium of heterogeneous substances, which contained all the basic results:[60] Gibbs's free energy $G=U-TS+PV$, the "phase rule," and so on. It was a lengthy, formal, and complex paper that was ignored for a decade. In the meantime, the main useful results were independently obtained and applied by Van't Hoff (1852–1911), Le Chatelier (1850–1936), and others. Their results were used by Haber in his research on the synthesis of ammonia, as we have already seen. The condition of the minimum of free energy for the reactants and the products of a reaction leads to the law of mass action, eq. (1), without any consideration of molecular collisions and independent of the intermediate steps of the reaction (see technical details in the Appendix, Section 1).

However, an important remark must be added in this respect. The equilibrium constant is obtained from free energy through an exponential [Appendix, *1*, eq. (a)]. It obviously depends on the temperature at which the reaction proceeds, and the determination of this dependence is crucial for technical applications. But the additive constant of entropy is reflected into an arbitrary multiplicative constant in the expression of the equilibrium constant, preventing the determination of its absolute "scale." In 1906, this problem led Nernst to formulate a new principle of thermodynamics, the Third Principle, which fixed the value of the additive constant of entropy at absolute zero (see below).

[60] J. W. Gibbs, On the equilibrium of heterogeneous substances, *Trans. Connecticut Acad.*, *3*, 1876–76, pp. 108–343; reprinted in J. W. Gibbs, *The Scientific Papers of J. W. Gibbs*, London, Longmans Green and Co, 1906, I, pp. 55–349.

It is worth insisting on the central aspect of this path taken by the chemists, namely the fact that thermodynamics provides a basic framework in which more general models and techniques can be conceived and developed than those allowed by a mechanistic framework.

This choice can also be verified in problems such as chemical kinetics that do not fall within equilibrium thermodynamics, but need the consideration of molecular collisions. For instance, Van't Hoff wrote:

> Reaction speed […] can be considered from two points of view. In the first place, we find support in thermodynamics, since the laws that govern speed must be compatible with the laws of equilibrium that are established in the end. In the second place, by referring to simple kinetic considerations, we can predict laws that have always received experimental confirmation. We will develop successively: A) reaction speed and equilibrium. B) kinetics of the reaction.[61]

This amounts to saying that thermodynamics, and not mechanics, provides the basic framework in which even models of chemical kinetics are specified. We will see that the approach adopted by Planck in 1900 followed precisely these steps.

In conclusion, mechanicism was rendered obsolete by the end of the nineteenth century, that is, before the twentieth-century revolution in physics, by chemists who found in thermodynamics a less restrictive and more flexible framework that allowed for greater freedom for the development of fruitful and innovative non-mechanical models.

Part 4: The birth of the new physics

Planck's papers of 1900

At the turn of the nineteenth century, many physicists of the older generation were convinced that the "construction" of physical knowledge—mechanics, thermodynamics, and electromagnetism—was almost complete, apart from some difficulties (such as the problems of aether, irreversibility, and the radiation field) whose solutions were to come rapidly. In contradiction with this belief, completely new phenomena were being discovered just at the end of the century that did not fall along this line of thought: X rays (1895), radioactivity (1896), the Zeeman effect (1896), the photoelectric effect (1897), and the discovery of the electron (1897).

[61] J. H. Van't Hoff, *Leçons de Chimie-Physique*, Hermann, Paris, 1899, p. 175: https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k91927k/f176.item.

The plot was thickening.

As we have already mentioned, Planck's viewpoint in the last years of the century was deeply different from that of Mach and Ostwald, but it diverged also from the concepts proposed by Boltzmann. As Planck would later recall in his autobiography:

> Boltzmann knew very well that my viewpoint was basically different from his. He was especially annoyed by the fact that I was not only indifferent but to a certain extent even hostile to the atomic theory that was the foundation of his entire research. The reason was that at that time, I regarded the principle of the increase of entropy as no less immutably valid than the principle of the conservation of energy itself, whereas Boltzmann treated the former merely as a law of probabilities. […] At any rate, he answered young Zermelo in a tone of biting sarcasm, which was meant partly for me, too, for Zermelo's paper had been published with my approval. This was how Boltzmann assumed that ill-tempered tone which he continued to exhibit toward me, on later occasions as well, both in his publications and in our personal correspondence; and it was only in the last years of his life, when I informed him of the atomistic foundation for my radiation law, that he assumed a friendlier attitude.[62]

To Planck, therefore, thermodynamics played the fundamental role with respect to the atomic structure of macroscopic systems, and the law of the increase of entropy was of an absolute nature. As I will discuss at the end, Planck's methodological attitude could hardly be considered "advanced" with respect to the innovative theories of the previous decades. In fact, he did not even accept the atomic model of matter. During his studies of the problem of natural radiation the 1880s and 1890s, he initially considered the energy exchanges between the electromagnetic field and the material oscillators on the wall of the radiation cavity, but he met difficulties and acknowledged "I had no other alternative than to resume the problem from the beginning, this time from the opposite point of view, from the side of thermodynamics: here I felt on my own ground."[63]

As a consequence, Planck developed a thermodynamic approach to the cavity radiation[64] based on the entropy of a single resonator (in fact, a concept incompatible with the statistical nature of entropy). As a basic tool for deriving the physical laws, he adopted the second

---

[62] Max Planck, *Wissenschaftliche Selbstbiographie*, Leipzig, Barth; Engl. transl., *Scientific Autobiography and Other Scientific Papers*, London: Williams & Norgate, 1950, 33: https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.177537.
[63] Ibid., 24.
[64] See the careful reconstruction by M. Badino, "How theories begin: a historical-epistemological study of Planck's black-body radiation theory," *Studies in the History and Philosophy of Science*, Part A, 12/2013: http://www.researchgate.net/publication/235006678_How_Theories_Begin_A_Historical-Epistemological_Study_of_Planck%27s_Black-Body_Radiation_Theory.

derivative of the entropy of a resonator with respect to its energy (see the Appendix for its statistical meaning, which at that time was obviously not clear). On this basis, he finally succeeded in "connecting" Wien's (widely accepted) heuristic law for the frequency distribution of cavity radiation to the simplest parametrization, i.e., a direct proportionality between the second derivative of the entropy and the energy of the resonator (see Appendix, Section 3, for technical details).[65]

The new results of the measurements of the full spectrum of cavity radiation were presented later in 1900 and showed a deviation from Wien's law. At this point, Planck was in a position to heuristically connect these results with a proportionality between the second derivative of the entropy and a linear quadratic dependence of the energy of the resonator (see the Appendix for technical details).[66] This was the first "derivation" of what is known as Planck's law. A parametrization obviously cannot be considered a proof of the law. Immediately after, Plank therefore tried to find a firmer foundation for the law.

Here I must highlight that *Scienza e Industria* still included a misinterpretation that, in those years, was shared by all the reconstructions of these developments. I refer to the erroneous claim, still commonly quoted in textbooks of physics, that Planck was aware of Rayleigh's approach, which was also introduced in 1900.[67] If this were true, it would have led to the so-called "Rayleigh formula," based on the equipartition of energy for the radiation frequencies. Following this usual interpretation, Planck would therefore have been left with no other choice but to find a "proof" of a statistical approach *a la* Boltzmann, which he had previously refuted. This historical interpretation is unjustifiable; it is false from every point of view. First of all, Rayleigh's very short note in the year 1900 did absolutely not propose the so-called "Rayleigh formula," but simply a formal change to Wien's heuristic law.[68] Moreover, the so-called "Rayleigh formula" was never really proposed as the physical distribution of cavity radiation.[69] In fact, in 1904, when Planck's law had been firmly confirmed experimentally, Rayleigh took it

---

[65] Max Planck, "Entropie und Temperatur strahlender Wärme," *Annalen der Physik*, *4*, 1900, pp. 719–737.
[66] Max Planck, "Über eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung," *Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft, 2 (13)*, 1900, pp. 202–204.
[67] Lord Rayleigh, "Remarks upon the law of complete radiation," *Phil. Mag.*, *49*, 1900, pp. 539–40.
[68] T. S. Kuhn, *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894–1912*, New York, Oxford University Press, 1978, pp. 144–52.
[69] N. Arias Avila and A. Baracca, "¿Quién propuso la 'fórmula de Rayleigh-Jeans'?," *Llull, Revista De la Sociedad Espanola de Historia de las Ciencias y de las Tecnicas*, *29*, 2006, pp. 5–18 (http://casanchi.org/fis/rayleigh_jeans01.pdf).

for granted, flipping the question: why does equipartition not apply to cavity radiation?

In conclusion, Planck's third approach in the year 1900[70] had absolutely nothing to do with Rayleigh's. Nevertheless, the interpretation already developed in *Scienza e Industria* was that Planck's approach could hardly be considered the early introduction of the quantum of energy. Such an assertion is based on several considerations. In the first place, Planck definitely did not consider the "energy element" *hv* to be a physical quantity. In fact, he explicitly wrote, "When the ratio [between the energy of the oscillators of a given frequency *v* and the "finite part," or "energy element," *hv*] is not an integer, we take the nearest integer."

In fact, Planck himself considered this for a long time to be a mathematical hypothesis, an artefact:[71] the procedure of "discretization" of a continuum problem was quite common at that time. In fact, for many years thereafter, Planck was extraordinarily reticent in ascribing any physical interpretation of these energy elements or of his new constant *h*.[72] In his Nobel lecture, Planck qualified the procedure in his paper as an "act of desperation." In 1901, he wrote, "In my opinion, this hypothesis essentially corresponds to *a definition of the probability W*" [author's italics].[73] He repeated in 1931, "It was a purely formal hypothesis, and I certainly did not devote much attention to it: the only thing that interested me, at any cost, was to arrive at a positive result."[74] Only in 1912 did Planck accept the truly statistical nature of the second law.[75]

The true revolution in twentieth-century physics: Einstein's contributions of 1902–1905

Before briefly considering Einstein's early contributions, it is worth pointing out that the twentieth-century physics revolution really consisted of three theories, which deeply changed the physical conceptions of the previous century. Einstein was the true father of all three, namely:

---

[70] Max Planck, "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum," *Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft, 2 (17)*, 1900, pp. 237–245.
[71] Helge Kragh. "Max Planck: the reluctant revolutionary," *Physics World*, December 2000, 31–35: https://physicsworld.com/a/max-planck-the-reluctant-revolutionary/.
[72] M. Planck, *Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie*, Leipzig: Barth 1920, Engl. transl. R. Jones and D. H. Williams, *A Survey of Physics*, London, Methuen, 1924, pp. 108–09; *Wissenschaftliche Selfbiographie*, Leipzig, Barth, Engl. transl. F. Gainor, *Scientific Autobiography and Other Papers*, New York, Philosophical Library, 1949, pp. 43–45.
[73] Max Planck. "Über die Elementarquanta der Materie und Elektrizität." *Annalen der Physik*, *4*, 1901, pp. 564–566.
[74] Max Planck, letter to R.W. Wood, October 7, 1931, cited in M.J. Klein, 1966, 27, and Hermann, 1971, *The Genesis of Quantum Theory (1899–1913)*. Cambridge MA: MIT Press, 23–24.
[75] Helge Kragh. "Max Planck: the reluctant revolutionary." *Physics World*, December 2000: 31–35: https://physicsworld.com/a/max-planck-the-reluctant-revolutionary/.

– *Statistical mechanics*, introduced in a formal way by Gibbs in 1902,[76] was formulated in much more physical terms between 1902–1904 by Einstein,[77] who removed any doubt about the origin of the paradoxes that had tormented nineteenth-century physicists, definitively acknowledging that mechanics and thermodynamics are independent and complementary points of view. To Einstein, thermodynamics was *statistical thermodynamics*.

– *Special relativity*, formulated by Einstein in 1905.[78] I limit myself to remark here that Einstein's formulation of special relativity substantially overcame the "aether wind" problem in a peculiar way, namely by assuming as postulates, on the basis of experimental evidence, the very problems that had to be solved. As Hirosige has remarked:

> The process by which Einstein's theory was gradually accepted during the latter half of the first decade of the [twentieth] century confirms the importance of the complete emancipation from the mechanistic worldview.[79]

– *The light quantum hypothesis*, formulated by Einstein in 1905.[80]

The first two theories are not discussed in detail in *Scienza e Industria*. Concerning Einstein's light quantum hypothesis, one must remark that he ascribed from the outset, beyond any doubt, a physical reality to the quantum. Einstein's approach confirms his methodological reliance on (statistical) thermodynamics, since the corpuscular light quantum hypothesis was "legitimated" (against the overwhelming accumulation of evidence for the wave nature of light) by the formal analogy of the logarithmic dependence of the entropy variation in an isothermal volume change in a gas and in cavity radiation: The entropy of monochromatic radiation of sufficiently low density varies with the volume in the same form as the entropy of an ideal gas, or a dilute solution. The electromagnetic radiation of low density (in the range of validity of Wien's formula for radiation) behaves thermodynamically as if it were composed of mutually

---

[76] W. J. Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics Developed with Special reference to the Rational Foundation of Thermodynamics*, Yale University Press, 1902; reprinted New York, Dover, 1960.
[77] Albert Einstein, "Kinetische Theorie der Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik," *Annalen der Physik*, *9*, 1902, pp. 417–433; "Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik," *Annalen der Physik*, *11*, 1903, pp. 170–187; "Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme," *Annalen der Physik*, *14*, 1904, pp. 354–362; Engl. transl. in A. Beck, *The Collected Papers of Albert Einstein*, Vol. 1, Princeton University Press, Princeton, 1987, respectively pp. 30–47, 48–67, and 68–77.
[78] Albert Einstein, "Zur Electrodynamik der bewegter Körper," *Annalen der Physik*, *17*, 1905, pp. 891–921; Engl. Transl. in Beck, *Albert Einstein*, 140–171.
[79] Tetu Hirosige, "The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity," *Historical Studies in the Physical Sciences*, *7*, 1976, pp. 3–82, citation p. 74.
[80] Albert Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt," *Annalen der Physik*, *17*, 1905, pp. 132–148; Engl. transl. in Beck, *Albert Einstein*, 86–103.

independent energy quanta of value $\gamma k \nu$.

Note that the light-quantum was not accepted until the 1920s, after the experiments by Compton. As T. Kuhn has argued:

> What brought Einstein to the blackbody problem in 1904 and to Planck in 1906 was the coherent development of a research program begun in 1902 [or even before, as we have argued: note is mine], a program so nearly independent of Planck's that it would almost certainly have led to the blackbody law even if Planck had never lived.[81]

And according to Abiko:

> Being unsatisfied with Planck's theory, Einstein's motive for composing the statistical trio [the three papers on statistical thermodynamics, 1902–1904] must have been somehow to construct a general thermodynamics, on which the theory, not only of fluids and solids, but also of thermal radiation could be based. […] The thread of his thought seems to have been the following. After reading Planck's 1900 paper, Einstein thought that, in order to derive Planck's formula, the resonator energy should be restricted to discrete values. But this means, from the viewpoint of energy conservation, that the energy of thermal radiation itself should also take only a discrete set of values. Therefore, he needed a more direct way somehow to corroborate this inference. This requirement subsequently led him to turn to the Brownian movement of a suspended mirror [in a cavity radiation], that was what he meant by 'a relatively direct method […] to learn something concerning the constitution of radiation from Planck's formula.'[82]

This line of thought was to lead Einstein to his 1907 paper on the specific heat of solids[83] and his 1909 paper on wave particle duality.[84]

Nernst theorem, 1906: The confluence of new physics with the approach introduced by nineteenth-century chemists

The Third Principle of thermodynamics, or "Nernst theorem," formulated by Walter Nernst in 1906, concretely represented the confluence of the method introduced at the end of the nineteenth century by chemists with the new approach only recently introduced by physicists. In fact, Nernst was a chemist, and (besides directing the German chemical warfare program) he was engaged with the problem of the determination of electrochemical equilibria, which had relevant

[81] T. S. Kuhn, *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity*, 170–171.
[82] Seiya Abiko."Einstein and quantum theory," *Physics Before and After Einstein: An Historical Perspective*, ed. M. Mamone Capria. Amsterdam: IOS Press, 2005, pp. 183–203.
[83] Albert Einstein, "Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme," *Annalen der Physik, 22*, 1907, pp. 180–190 and 800 (Berichtigung).
[84] Albert Einstein, "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems," *Physikalische Zeitung, 10*, 1909, pp. 185–193.

industrial implications, such as the production of sodium, phosphorus, and aluminum.[85] He was also concerned with the problem of ammonia synthesis.

> By 1905 Fischer, Ostwald, and Nernst wished to improve Germany's competitive position in science and industry, particularly by promoting research in increasingly significant areas outside classical organic chemistry.[86]

Nernst acknowledged[87] that the arbitrary additive constant in entropy, and consequently in free energy, was reflected by an arbitrary multiplicative constant appearing in the expression of the equilibrium constant [see Appendix, eq. (a) for technical details], which prevented the determination of its absolute value using thermal data. This conclusion convinced him that space was left in thermodynamics for a third principle which unambiguously determines the values of the chemical equilibrium constants. Later, he wrote:

> The full content of thermodynamics is exhausted by the new principle, which eliminates the indeterminacy resulting from the presence of an indeterminate additive constant in every particular case of application of the second principle.[88]

Nernst acknowledged that the most direct consequence of the third principle was that specific heats should vanish at absolute zero. Therefore, he started taking out measurements at decreasing temperatures, which confirmed at least the decrease of the specific heats (although he was very far from absolute zero). At the same time, he realized that Einstein had proposed a physical model predicting precisely this behavior. He thus turned into an advocate of the new quantum theory, which led him organize the first Solvay Conference in Brussels in 1911. On that occasion, Jeans and Rayleigh (though the latter was not able to participate) were the only ones who supported the old classical theories and approach. That "new generation convinced of the new ideas" had come into being, accepting and exercising full freedom to work out physical hypotheses and formal developments unrestricted by the mechanistic approach and reductionism—opening new fields, phenomena, and physical frameworks in the process.

---

[85] Johnson, *Kaiser's Chemists*, 31–33, 44–47.
[86] Ibid., 39–40.
[87] Walther Nernst, "Über die Berechnung chemischer Gleichgewichte aus thermischen Messungen," *Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Kl.*, 1906, pp. 1–40.
[88] Walther Nernst, *Traité de Chimie Générale*, Paris, Hermann; first German edition, *Theoretische Chemie vom Standpunkte der Avogadroschen Regel und der Thermodynamik*, Göttingen, 1893; English transl., *Theoretical Chemistry from the Standpoint of Avogadro's Rule and Thermodynamics*, London, 1923, Vol. 2, p. 356.

Part 5: The early atomic models

The last chapter of *Scienza e Industria* deals with the early atomic models at the beginning of the twentieth century. Once again, the analysis insists on the conceptual difference between the early models conceived within the reductionist philosophy that still dominated in Great Britain and the successive deep break constituted by the Bohr model of 1913. In fact, the first approaches of J. J. Thomson had obtained very interesting and promising physical results; they made it seem as if the interruption of such a deep change would not be necessary. Once more, this change seems due to a reversal of mentality and of the conception of the role and nature of physical explanation.

Three items are discussed. The first one deals with the atomic model proposed by J. J. Thomson (1856–1940), the so-called "plum pudding model," between 1903 and 1913. He developed it immediately after his discovery of the electron but before the discovery of the atomic nucleus, which came as a consequence of Rutherford's experiments on electron scattering. In the textbooks, this model is often presented as an essentially qualitative model, though over the years Thompson also developed rigorous quantitative considerations and tried to incorporate them into a coherent theoretical framework based on classical physics. Around 1903-–1904, he argued that in order to ensure the stability of the atom,[89] the electrons must dispose themselves in successive orbits, whose diameter and whose number of electrons are determined by the equilibrium between the attractive force exerted by the diffuse positive electric charge, the mutual repulsion between the electrons, and the centrifugal force due to their motion. At the second Solvay congress of 1913 on the structure of matter, Thomson presented an alternative to the new quantum concepts and proposed to attribute Planck's formula $E=h\nu$ to a basic atomic property instead of to the physical structure of radiation, deriving it from the fact that the laws of the electric forces inside the atom differ from those known in electrostatics.

But the reach of Thomson's model went well beyond his physical considerations, since he speculated on the possibility of explaining the chemical bond. In his first step, developed in a book of 1907,[90] he showed that the properties he calculated for the atoms containing between 59 and 67 electrons exactly corresponded to the observed properties of the elements of the first group of the periodic table (it must be remarked that the number of the electrons in the atoms, or

[89] J. J. Thomson, *Electricity and matter* ("Silliman Lectures" at Yale University, 1903), Westminster, New York, 1904.
[90] J. J. Thomson, *The Corpuscular Theory of Matter*, London, 1907.

what is now known as the atomic number, was not known until the year 1913, when the law of Moseley was established— see below). It must also be remarked that at that time there was still no clear distinction between electromagnetic and radioactive radiations; they were successively attributed to the external electrons and the nucleus, respectively.

Thomson's considerations intertwined, although they were of a different nature, with the static atomic models proposed by the chemists devoted to the interpretation of valence, and in particular to the new concept of the covalent bond. These models had been anticipated in 1902 by the American chemist G. N. Lewis (1875–1946) in an unpublished memorandum for didactic use. Lewis developed his earlier theory in 1916, and it was taken further by I. Langmuir (1881–1957), who notably studied in Germany and began working, in 1909, at the research laboratory of General Electric (the first example in the United States after the economic crisis of 1893 of an industrial laboratory dedicated to fundamental research). In short, in 1916, Lewis[91] re-proposed and further developed his previously unpublished cubic atomic model of 1902, on the basis of which he explained the concept of covalent bonds and reconstructed the periodic system of the elements. In this same year, Langmuir, starting from his innovative research in the GE laboratory on incandescent metallic light bulbs, proposed a theory of the constitution and fundamental properties of solids and liquids. In 1916, he explicitly considered the existing atomic models, starting from a criticism of both the Thomson and the Bohr models (in particular because the latter ignores the results of stereochemistry) and developing in their place the model proposed by Lewis. In 1919—after a parenthesis in the war period, during which he worked on submarine detection—Langmuir developed the concept that the stable groups are those composed by two or eight, or an even number of electrons.[92]

In the meantime, E. Rutherford (1871–1937) had been developing his studies of spontaneous radioactive processes and the atomic models since the early years of the century, starting with his fundamental experiments on the scattering of α-particles, which led him to the concept of the atomic nucleus and planetary atom.[93] The planetary model suffered from the well-known problems of instability and did not immediately supplant that of Thomson, who at the Solvay conference proposed to attribute the anomalous α-scattering to the presence of α-particles in the positive charge of the atom and to deviations from the interaction Coulomb law. However, in the

[91] G. N. Lewis, *Journal of the American Chemical Society*, 38, 1916, p. 762.
[92] I. Langmuir, *Journal of the American Chemical Society*, 41, 1919, p. 868.
[93] E. Rutherford, *Philosophical Magazine*, 21, 1911, p. 669.

following years new results accumulated which paved the way to the acceptance of the planetary model. Nevertheless, in a series of lectures at the Franklin Institute in Philadelphia in 1923,[94] Thomson still proposed a static model that was explained as a series of chemical and physical-chemical phenomena.

The turning point came, as is well known, with the Bohr model of 1913. A recent graduate in Copenhagen in 1911, Niels Bohr (1885–1962) moved first in Cambridge and tried to interact with Thomson. Finding that this was not possible, he then moved to Manchester and studied with Rutherford. There, in July of 1912, Bohr formulated a premise to his model of 1913 in a manuscript memorandum written for Rutherford.[95] The considerations in the memorandum noticeably differ from those developed in the "triad" of papers of 1913–1914. One must remark that at that time the nuclear model of Rutherford did not appear at all better suited than that of Thomson to explaining the whole of the physical and chemical phenomena. Anyway, in his 1912 memorandum, Bohr adopts the planetary model, although he restricts himself to the consideration of the fundamental state and does not consider transitions and emission phenomena. He explicitly states that for the atoms to be stable it is necessary that the electrons are in motion. However, the problem of stability cannot be solved in the context of mechanics, and he puts forward a hypothesis: "This hypothesis, for which there will be given no attempt of a mechanical foundation (as it seems hopeless*), is chosen as the only one which seems to offer a possibility of an explanation of the whole group of experimental results, which gather about and seems to confirm conceptions of the mechanisms of the radiation as the ones proposed by Planck and Einstein."[96] In such a procedure, one may see *in nuce* the roots of a radical change which would progressively emerge in the elaboration of a new scientific attitude and approach: Thermodynamics shall no longer be the general framework in which new, non-mechanical laws are elaborated, but new quantization rules shall be directly postulated in a non-mechanical approach in order to explain phenomena in a rather pragmatic way. The systematic adoption of this approach was to lead in subsequent years to a radical contrast with the previous approach, abandoning the description of the evolution of an atomic system in space and time, considered by Einstein a necessary requisite of a physical theory.

---

[94] These lectures were later collected in a book: J.J. Thomson, *L'Electron en Chimie*, Paris, 1926.
[95] Niels Bohr, *The Rutherford Memorandum* (1912), reproduced in L. Rosenfeld (General Editor), *Niels Bohr: Collected Works: Volume 2, Work on Atomic Physics (1912–1917)*, ed. U. Hoyer, North-Holland, Amsterdam, 1981, 135–178.
[96] Ibid., 137.

For the stability of the orbit in the fundamental sate, in the 1912 memorandum Bohr assumes that "a definite ratio exists between the kinetic energy of the electron and its time of rotation."[97] Nevertheless, in his 1912 memorandum Bohr did not yet mention the Planck constant *h*. In any case, the assumption of a fixed ratio between the energy of the electron in a stable orbit and its frequency of rotation contradicts the link that was assumed at that time between the frequencies of the emitted or absorbed radiation and the rotation frequencies of the electron.

The 1912 memorandum does not, however, even mention the atomic spectra, which was instead to be the starting point of the subsequent papers of 1913. The main attention was instead devoted to qualitative considerations of the chemical bond, conceived as the "shared" electron orbits of two atoms, an idea that seems to anticipate that of a covalent bond.

A final remark may be convenient. The subsequent papers of 1913 intertwined with the discovery of the Moseley[98] law, resulting in the atomic number.

The Bohr model anticipated the new turning point of the formulation of orthodox quantum mechanics in the mid-1920s, which marked the culminating point of the evolution towards the increasing formalization and abstraction of physical theories.

[97] More precisely, he assumes a ratio between its kinetic energy and its rotation frequency, $E = k\,\nu$, where k is a constant.

[98] The brilliant British physicist Henry Moseley (1887–1915) died very young, when he was barely 18, during his military service in the battle of Gallipoli in Turkey. It was a real tragedy for science; he would have certainly been awarded the Nobel prize for his fundamental discovery.

Appendix: Technical Considerations

This Appendix summarizes some useful technical aspects in order to better understand the substance of the main turning points analysed in *Scienza & Industria*.

1. Thermodynamic functions and chemical equilibrium

The method in which chemical equilibrium is calculated from free energy is easily exemplified for the case of ideal gases. In a chemical reaction among gaseous substances (for simplicity at constant *T* and *V*), the Helmholtz free energy, *F=U-TS*, of each component has the expression

$$F=(U-TS_0)+nRTlnP=F_0+nRTlnP, \quad \text{where } F_0=U-TS_0.$$

The variation of this free energy, for instance in the specific reaction $3H_2+N_2 \leftrightarrow 2NH_3$, is therefore

$$\Delta F=nRTln\frac{P_{NH_3}^2}{P_{H_2}^3 P_{N_2}}+\Delta F_o \tag{a}$$

[where ΔF_o corresponds to the difference of the constant terms in eq. (4) of the text], so that the equilibrium constant results in

$$\frac{P_{NH_3}^2}{P_{H_2}^3 P_{N_2}}=e^{-\Delta F_0/nRT}=K_p(T), \tag{b}$$

that is to say exactly eq. (1) of the text.

2. The change in statistical mechanics with respect to kinetic theory

In the kinetic theory thermodynamic functions are *built up* starting from molecular collisions (reductionism). In statistical mechanics macroscopic properties are defined in a *Γ*-space with *2sN* dimensions (being *s* the number of degrees of freedom of the particles composing the system) by an abstract *probability function ρ(q,p)*, which is directly and univocally related with the thermodynamic function that characterises the specific macroscopic state. For instance, in the *microcanonical ensemble*, which represents an isolated system of energy *U*, *it is assumed* $\rho_{micr}(q,p)=const$, and the entropy of the system corresponds to the volume occupied by the state in the *Γ*-space, namely

$$S(N,U,V) = k_B \ln \wp(N,U,V), \quad \text{where} \quad \wp = \int \ldots \int d^{sN}q d^{sN}p.$$

This appears even more evident in the *canonical ensemble*

$$\rho_{can}(q,p) = \exp\{[F(T,N,V) - E(q,p)]/k_BT\} = \exp\{F(T,N,V)/k_BT\}.\ \exp\{-E(q,p)/k_BT\}, \tag{c}$$

which corresponds to a state of fixed temperature *T* of the system, whose free energy simply corresponds to the normalization of probability

$$F(T,N,V) = -k_B T \cdot \ln \int\{\exp[-E(q,p)/k_B T] d^{sN}q\, d^{sN}p\}\}.$$

Generalisation to quantum statistical mechanics. Such a direct relationship with thermodynamics implies that the generalization of the formalism to quantum statistical mechanics retains the same functional dependence, changing the classical functions for the corresponding quantum operators

$$\rho = \exp(F-H)/k_B T.$$

3. Planck's first thermodynamic calculation in 1900

Planck had already associated Wien's formula (7) with the lowest-order parametrization of function $\left(\frac{\partial^2 s}{\partial \varepsilon^2}\right)^{-1} = -\alpha\varepsilon$: in fact, from the first principle $\partial s/\partial \varepsilon = 1/T$, whence $\partial s/\partial \varepsilon = -1/\alpha \cdot \ln(\varepsilon/\beta)$ gives the energy of the resonator $\varepsilon = \beta \cdot \exp(-\alpha/T)$, and the density of radiant energy

$$u(\nu,T) \cdot d\nu = 8\pi\beta/c^3 \cdot \nu^3 \cdot e^{-\alpha(\nu T)} \cdot d\nu.$$

Wien's formula reproduces only the high-frequency region of the spectrum of radiation: Planck studied therefore the higher order parametrization

$$\frac{\partial^2 s}{\partial \varepsilon^2} = \frac{-\alpha}{\varepsilon^2 + \gamma\varepsilon}. \tag{d}$$

By integrating one obtains

$$1/T \equiv \partial s/\partial \varepsilon = (\alpha/\gamma) \cdot \ln[(\gamma+\varepsilon)/\varepsilon], \tag{e}$$

that is

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{\exp(\alpha/\gamma T) - 1}.$$

And finally, since the general Wien's theorem requires that $\gamma = A\nu$, y $\alpha/\gamma = B\nu$, Planck's formula

$$u(\nu,T) = \frac{A\nu^3}{e^{B\nu/T} - 1}.$$

4. Planck's formula as interpolation between Wien's and Rayleigh's formulations

It is immediate to see that only the quadratic term, $\partial^2 s/\partial \varepsilon^2 = -1/c\varepsilon^2$, gives $1/T \equiv \partial s/\partial \varepsilon = c \cdot \varepsilon^{-1}$, that is $\varepsilon = c^{-1} \cdot T$, which would correspond to Rayleigh's formula, since for the general law of Wien c^{-1} must be proportional to the frequency ν: in this sense Planck's formula can be seen as an interpolation between Wien's and Rayleigh's.

5. The second of Planck's 1900 calculations

The energy E of the oscillators of frequency ν can be expressed in terms of the number z_ν of states of

average energy , or of the number n_ν of energy quanta ε_0: $E=z_\nu \cdot \bar{\varepsilon}=n_\nu \cdot \varepsilon_0$. The probability (10) *assumed* by Planck leads to the entropy of an oscillator, using Stirling approximation for the factorial

$$s_\nu = \frac{S_\nu}{z_\nu} = \frac{k_B \ln W\nu}{z_\nu} = \frac{k_B}{z_\nu} \ln \frac{(z_\nu + n_\nu)^{(z_\nu + n_\nu)}}{z_\nu z_\nu n_\nu n_\nu} = k_B \left[\left(\frac{n_\nu}{z_\nu}+1\right) \cdot \ln\left(\frac{n_\nu}{z_\nu}+1\right) - \frac{n_\nu}{z_\nu} \ln \frac{n_\nu}{z_\nu}\right]$$
$$= k_B \left[\left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0}+1\right) \cdot \ln\left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0}+1\right) - \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \cdot \ln \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right].$$

The thermodynamic relation $\partial s/\partial \varepsilon = 1/T$ leads finally to

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial s_\nu}{\partial \bar{\varepsilon}} = \frac{k_B}{\varepsilon_0} \cdot \ln\left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\bar{\varepsilon}}\right).$$

This expression coincides with eq. (c), that Planck intended to justify, so that the average energy of a resonator of frequency ν results

$$\bar{\varepsilon}(\nu,T) = \frac{\varepsilon_0}{e^{\varepsilon_0/k_B T}-1}.$$

And for the general Wien's law, it must be $\varepsilon_0 = h\nu$.

6. The physical meaning of the function $\left(\frac{\partial 2\, s}{\partial \varepsilon 2}\right)^{-1}$ and the wave-particle duality

Expressing the probability as $W=\exp(S/k_B)$, at equilibrium (S maximum) it must be $\partial s/\partial \varepsilon=0$, and the second-order development come out to be: $s(\varepsilon)=s(\bar{\varepsilon}) + \frac{1}{2}(\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2 \cdot \partial^2 s/\partial \varepsilon^2$. One has therefore

$$\overline{(\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2} = \frac{\int (\varepsilon-\bar{\varepsilon})^2 \cdot W(\varepsilon)}{\int W(\varepsilon)} = \frac{\int (\varepsilon-\bar{\varepsilon})^2 \cdot e^{\frac{1}{2}k_B(\partial^2 s/\partial e^2)(\varepsilon-\bar{\varepsilon})^2} d\varepsilon}{\int e^{\frac{1}{2}k_B(\partial^2 s/\partial \varepsilon^2)(\varepsilon-\bar{\varepsilon})^2} d\varepsilon} = \frac{2\left[\frac{1}{2}k_B(\partial^2 s/\partial \varepsilon^2)\right]}{4\left[\frac{1}{2}k_B(\partial^2 s/\partial \varepsilon^2)\right]^3} = -k_B\left(\frac{\partial^2 s}{\partial \varepsilon^2}\right)^{-1}$$ using the Gaussian integrals $\int x \cdot \exp(-ax^2)dx = \frac{\sqrt{\pi}}{4a^3}$, and $\int \exp(-ax^2)dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a}$.

Planck's parametrization (d) implies (Einstein, 1909)

$$\overline{(\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2} = -A\varepsilon - B\varepsilon^2,$$

That is, two independent contributions to fluctuations, respectively of a particle and a wave nature.

7. Stimulated emission of radiation and Planck's law

Consider in the first place only the two traditional processes of *absorption* and *spontaneous emission*. The number N_{abs} of photons absorbed per unit time and volume is proportional to the number N_1 of atoms in the fundamental state E_1 and the density u_ν of photons

$$N_{abs} = B_{12}(\nu) \cdot u_\nu \cdot N_1.$$

Spontaneous emission by an atom in the excited state E_2 does not require the presence of radiation: the number of emitted photons is therefore proportional to

$$N_{em,esp} = A_{21}(\nu) \cdot N_2.$$

In thermal equilibrium N_{abs}=$\text{N}_{\text{em,esp}}$, and for eq. (c) $N_2/N_1 = \exp - (\text{h}\nu/k_B\,T)$, so that it results in

$$u_\nu = \frac{A_{21}\cdot N_2}{B_{12}/N_1} = \frac{A_{21}(\nu)}{B_{12}(\nu)} \cdot e^{-\text{h}\nu/k_B T},$$

that is Wien's law (7), with $A_{21}/B_{12} = 8\pi\text{h}\nu^3/c^3$.

If one takes into account *stimulated emission*, it must be instead $N_{\text{em,est}}$=$\text{B}_{21}(\nu) \cdot u_\nu \cdot N_2$. In thermal equilibrium between absorption and emission it must be

$$B_{12}(\nu) \cdot u_\nu \cdot N_1 = \text{A}_{21}(\nu) \cdot N_2 + \text{B}_{21}(\nu) \cdot u_\nu \cdot N_2$$

whence

$$u_\nu = \frac{A_{21}}{B_{12}} \cdot \frac{1}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \cdot \frac{N_1}{N_2} - 1} = \frac{A_{21}}{B_{12}} \cdot \frac{1}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \cdot e^{\text{h}\nu/k_B T} - 1}$$

which is Planck's formula, with B_{12}=B_{21}, y $A_{21}/B_{12} = 8\pi\text{h}\nu^3/c^3$.

Scienza e Industria 1848–1915: Gli Sviluppi Scientifici Connessi alla Seconda Rivoluzione Industriale

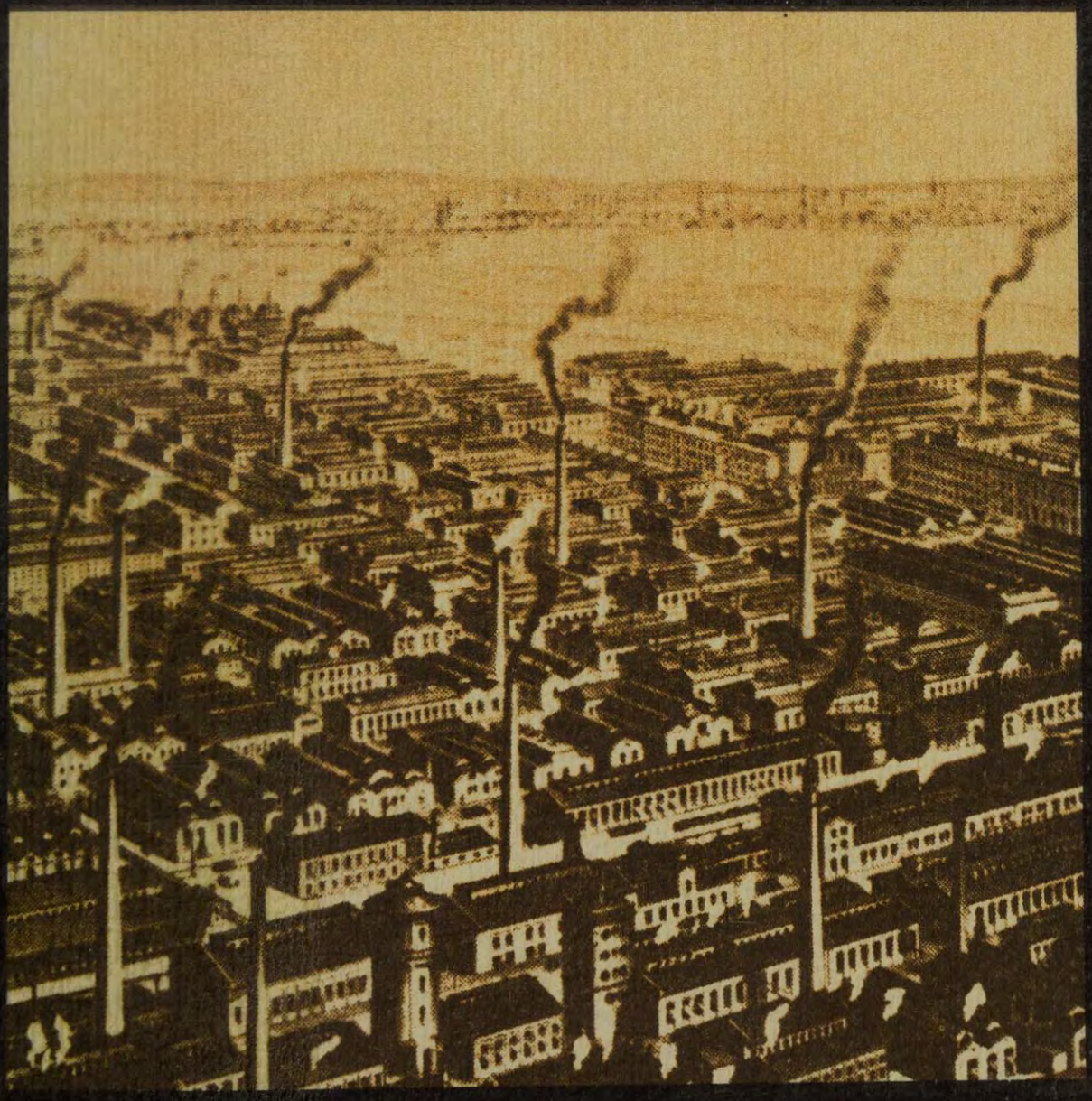
A reprint of the original publication

Scienza e Industria 1848–1915 by A. Baracca, S. Ruffo, and A. Russo was published in 1979 by Laterza. The publisher no longer hold the rights to this publication and thus have no objection to its reproduction in this preprint edition. Many thanks to Toan Tran Ngoc of the MPIWG's library for the digitization of this book.

UNIVERSALE LATERZA UL

Scienza e industria 1848-1915

A. Baracca S. Ruffo A. Russo



Universale Laterza
505

Angelo Baracca Stefano Ruffo Arturo Russo

SCIENZA E INDUSTRIA 1848-1915

Gli sviluppi scientifici connessi alla seconda rivoluzione industriale

Editori Laterza 1979

Finito di stampare nel marzo 1979
nello stabilimento d'arti grafiche Gius. Laterza & Figli, Bari
CL 20-1532-3

Introduzione

Nella nostra società la scienza gioca un ruolo singolare. Da un lato essa informa di sé ormai tutti gli aspetti della vita sociale, entra come componente essenziale in tutte le nostre attività di lavoro, di gioco, di svago. Dall'altro però essa è nei suoi contenuti specifici, nelle sue tecniche (pratiche e formali) sempre più lontana dalla comprensione reale da parte dei non addetti ai lavori, sempre più staccata dall'immediatezza di molte forme della vita quotidiana.

Uno degli esempi più evidenti di questo distacco (non perché si tratti dell'aspetto o del settore più appariscente, ma perché è almeno uno dei componenti di base, e di fatto è quello di cui noi qui ci occupiamo) è costituito dalla cosiddetta « fisica moderna ». Chi non conosce ormai (magari dalle pagine cosiddette « scientifiche » dei quotidiani) il suo programmatico distacco dai concetti comuni, il suo carattere formale, matematico, anti-intuitivo? Non si deve cercare — si dice — di capire le proprietà degli atomi e delle particelle sub-atomiche in termini della nostra vita di tutti i giorni. Solo agli specialisti è dato di conoscere e controllare quei raffinati strumenti concettuali che soli possono permettere una piena comprensione di questo tipo di fenomeni fisici. Questa tesi viene imposta nelle esposizioni cosiddette « divulgative » della fisica moderna (ma anche, sia pure in modo meno rozzo, sui manuali didattici) in modo dogmatico e autoritario. Si tratta del resto di una caratteristica comune a tutta la « divulgazione » scientifica, la cui funzione principale, a nostro parere, è quella di diffondere e imporre l'ideologia scientista dominante, piuttosto che far capire realmente al grande pubblico i contenuti della scienza: questi rimangono invece costantemente misteriosi e incomprensibili, se non addirittura mascherati ancor più da esemplificazioni troppo « in-

tuitive » o grossolane per avvicinare alla complessità delle teorie scientifiche e dei sofisticati formalismi matematici che in esse hanno sostituito definitivamente l'intuizione.

Se questa forma di « divulgazione » è ideologica e scorretta, si tratta allora di rispondere ad una domanda: per comprendere gli sviluppi della scienza è inevitabile la divaricazione tra i suoi contenuti formali e la vita quotidiana? Se così fosse, non vi sarebbe via d'uscita: se la scienza è comprensibile solo in termini dei suoi contenuti « tecnici » specifici non è possibile allora altra forma di « divulgazione ». Da questa conclusione se ne ricava però inevitabilmente un'altra, che ci sembra decisamente inaccettabile: quella cioè che i non addetti ai lavori sono necessariamente esclusi per sempre dalla comprensione dei contenuti reali della scienza; e sono pertanto esclusi di fatto pure da qualsiasi forma di controllo reale sulle scelte, sulle applicazioni, sulle utilizzazioni dei risultati più nuovi della scienza. Mentre per la comprensione ed il controllo reali di questi ultimi è necessario per l'appunto — ribaltando la funzione di organizzazione del controllo sociale svolto dalla usuale « divulgazione » — privilegiare e chiarire ai non addetti ai lavori le condizioni generali e le motivazioni di fondo dello sviluppo scientifico, recuperando proprio su questa base un significato più concreto e più trasparente degli stessi sviluppi formali, attraverso la concreta funzione che essi devono svolgere.

In effetti, crediamo che si possa dare per scontata anche per i non addetti ai lavori la consapevolezza del fatto che tra '800 e '900 si registra una svolta radicale nella prassi scientifica, parallelamente al sorgere in fisica delle nuove teorie che sono alla base degli sviluppi di tutta la fisica moderna: la *teoria dei quanti* e la *teoria della relatività*. Si tratta di una vera e propria rivoluzione scientifica che stravolge completamente i metodi, i contenuti, le finalità della scienza ottocentesca. La straordinaria mole di nuovi fenomeni fisici che vengono messi in luce dagli sviluppi tecnologici connessi alla cosiddetta « seconda rivoluzione industriale » mette in crisi la prassi scientifica tradizionale e le concezioni della « fisica classica » (la meccanica « classica », l'elettromagnetismo, la teoria cinetica).

Il punto di vista più comune sulla svolta che si produce è che le leggi della fisica « classica » non sono più in grado di rendere conto dei nuovi fenomeni. In una tale ricostruzione degli eventi di quel tempo la difficoltà formale dei problemi fisici specifici viene messa in secondo piano appellan-

dosi ad un atto di fede, giustificato dalla pretesa semplicità e linearità degli eventi più esteriori e della loro successione: l'esperimento di Michelson e Morley del 1881 mostrerebbe l'incompatibilità tra le leggi della meccanica « classica » e quelle dell'elettromagnetismo, che Einstein risolverebbe poi nel 1905 riformulando le leggi della meccanica nella teoria della relatività ristretta; il problema del corpo nero, d'altra parte, sarebbe inspiegabile in base alle leggi classiche e si renderebbe così necessario l'abbandono della continuità dei processi su cui si fonda la fisica « classica » con l'introduzione — da parte di Planck nel 1900 — dell'« ipotesi dei quanti », cioè dei trasferimenti di energia per quantità discrete; la complessità dei fenomeni fisici che si indagano successivamente (struttura degli atomi) e la necessità di inglobare le nuove ipotesi in una teoria compatta e coerente esigerebbero poi gli ulteriori sviluppi più formali e la formulazione di una nuova « meccanica quantistica », con il definitivo e programmatico abbandono dei concetti intuitivi. La drastica sconfitta delle teorie classiche e la rapida affermazione delle nuove concezioni vengono portate come prove di questa interpretazione dei fatti, cioè dell'inevitabilità della svolta.

A questo punto il profano è completamente disarmato e, rimanendo espropriato del controllo degli strumenti formali, non può che accettare acriticamente questa tesi e, con essa, la propria esclusione dalla comprensione della fisica moderna.

Tuttavia, su un diverso piano egli potrebbe maturare qualche dubbio. Da un lato non è difficile, infatti, richiamare alla mente il fatto (su cui peraltro la nostra cultura umanistica non insiste molto) che alle svolte economiche di fine '800 si accompagna una profonda ridefinizione del ruolo della scienza e porsi così il problema se ciò non abbia indotto modifiche radicali anche nella prassi scientifica, nelle sue finalità, e quindi nei suoi strumenti tecnici e formali. D'altra parte è un fatto che la svolta del '900 non è riconducibile *tout court* a difficoltà fisiche insormontabili, ai soli problemi sorti all'interno della scienza; diverse linee interpretative e diversi modelli di spiegazione scientifica erano infatti presenti in quegli anni all'interno della comunità scientifica e tutti si presentavano ugualmente promettenti rispetto alla necessità di comprendere e spiegare i nuovi fenomeni fisici. Infine non si può mancare di rilevare come la linea che storicamente risultò vincente maturi in primo luogo nell'ambiente scientifico tedesco, proprio quando la Germania si trova ad assumere un

ruolo sempre più d'avanguardia al livello dello sviluppo economico e produttivo e questo proprio grazie al nuovo rapporto tra scienza e industria.

Nel presente saggio ci siamo quindi proposti di ricostruire in dettaglio l'ambiente scientifico, produttivo e sociale della Germania di fine '800, per recuperare integralmente il contesto nel quale hanno luogo la crisi delle vecchie concezioni e la nascita delle nuove teorie, e capire così l'insieme dei condizionamenti, delle motivazioni, delle finalità nel cui ambito si plasma la nuova prassi scientifica.

In questa analisi ci ha ovviamente guidato una specifica concezione di che cosa sia la scienza e di come si debba intendere il suo sviluppo, in termini più complessivi di quanto non traspaia dalle argomentazioni sin qui esposte; per questo rimandiamo ad una serie di studi recenti [28; 29; 30]. Un punto almeno va però qui richiamato. Particolarmente importante nel seguito risulterà infatti il problema della dialettica tra forze produttive e rapporti di produzione, proprio per l'analisi concreta di determinate forme di organizzazione sociale e produttiva, dei loro cambiamenti e dello specifico rapporto che nel loro ambito l'uomo stabilisce con la natura.

È necessario a questo scopo partire dal riconoscimento che la forma generale di tale rapporto è essenzialmente il lavoro, ovvero l'attività produttiva socialmente organizzata che tende a dominare e modificare la natura al fine di soddisfare bisogni precisi. È sì vero che qualunque attività di questo tipo non può in alcun modo prescindere dalla conoscenza di quegli aspetti pertinenti dei processi naturali che, con modalità specifiche e pur sempre socialmente condizionate, ne sono alla base; ma è anche vero che le forme, i modi, i contenuti specifici con i quali viene acquisita quella stessa conoscenza sono sempre determinati dal carattere socialmente *interessato* della prassi scientifica e quindi, in forma più o meno mediata, dai rapporti di produzione che inquadrano una specifica organizzazione del lavoro. D'altra parte, in ogni epoca storica l'organizzazione del lavoro, il modo di produzione nel suo complesso — e quindi a maggior ragione gli schemi culturali, i moduli interpretativi ed anche gli interessi specifici nei confronti della natura — non sono mai determinati solo dal livello di sviluppo delle forze produttive, ma sono condizionati in modo determinante anche dai rapporti esistenti tra le classi sociali. E infine anche le caratteristiche delle forze produttive non dipendono affatto solo da proprietà puramente naturali dei

fenomeni che via via entrano nella produzione, ma portano impresso in modo indelebile — come avremo occasione di mostrare concretamente — il marchio dei rapporti di classe all'interno dei quali esse si plasmano. La dialettica tra rapporti di produzione e sviluppo delle forze produttive — che è il motore della storia — avviene insomma sul terreno concreto e reale dello scontro di classe e costituisce uno degli assi fondamentali dell'analisi della scienza condotta nel presente saggio. È questa la sola base, a nostro avviso, che consenta di comprendere effettivamente perché una comunità scientifica definita ponga alla natura determinate domande con certi tipi di strumenti (concettuali oltre che materiali), articolando quindi, sulla base di risposte che vanno comunque interpretate, una immagine del mondo organica alle esigenze poste dal contesto economico e sociale (anche attraverso le indispensabili mediazioni filosofiche).

Per fare un esempio: i Greci, come è noto, malgrado l'elevatissimo livello della loro capacità di analisi razionale del mondo e un bagaglio non indifferente di conoscenze tecniche, non riuscirono a sviluppare una meccanica moderna e questo per l'esistenza di abbondante lavoro schiavistico e il conseguente disprezzo per le attività manuali. Il movimento dei corpi era osservato e interpretato alla luce di una concezione filosofica generale del mondo piuttosto che con lo scopo di comprenderne le leggi più semplici al fine di ricavarne lavoro. Una scienza delle macchine comincia a prendere forma con l'emergere dei primi strati borghesi, mentre si precisa nel XVIII secolo il concetto di lavoro meccanico con l'avvio della rivoluzione industriale in Inghilterra e con il ruolo assunto nella produzione da quello che Marx chiamerà « lavoro generale e astratto ».

In altri termini, le differenze profonde che si registrano nell'operare scientifico e nelle stesse concezioni della scienza in diversi paesi e in diverse epoche storiche non sono rapportabili a differenze nel grado di avvicinamento o di comprensione di una realtà naturale immutabile e incontaminata. È vero invece che la natura, così come è data dalla prassi scientifica, non può essere intesa se non come termine di un rapporto di cui l'altro termine è sempre l'uomo come essere sociale e materialmente interessato e la realtà « oggettiva » sulla quale la scienza opera non è mai la sola natura. Questa realtà al contrario assume anche una dimensione storica e sociale che, se non intacca il fatto che la natura, come realtà materiale,

preesiste a qualunque conoscenza razionale di essa, fa sì che essa sia *data per l'uomo* in forme materialmente condizionate. È allora necessario tenere conto del fatto che in ogni epoca storica sono potenzialmente aperte molte strade allo sviluppo della scienza, alternative diverse tanto all'indagine naturale quanto al modo di recepire e di interpretare ciò che si sceglie di indagare: la scelta che storicamente si afferma non è comprensibile in termini di pura aderenza ad un sostrato naturale dei fenomeni ma si inquadra pienamente nel contesto delle finalità che emergono al livello della struttura sociale e dei rapporti tra le classi.

In quest'ottica, sforzandoci di recuperare integralmente tutti i fattori che possono avere pesato sulle scelte di sviluppo e sulla prassi scientifica, ma anche mantenendo tra di essi criteri di priorità omogenei con la premessa testé fatta (e verificata poi puntualmente di volta in volta nel corso della nostra analisi), siamo giunti ad una ricostruzione delle svolte di fondo della scienza tra '800 e '900 che differisce molto da quella tradizionale (e mostra anche di questa la profonda insufficienza e parzialità). In una parola, il punto centrale attorno a cui ruota la nostra analisi è che i cambiamenti più profondi, significativi e duraturi della prassi scientifica maturano *negli ultimi trent'anni dell'800 nel settore della ricerca e dell'industria chimiche*, per i nuovi livelli scientifici ed organizzativi che ad esso sono richiesti e imposti dallo sviluppo della *seconda rivoluzione industriale in Germania.* Non vogliamo certo dire che tutto lo sviluppo scientifico sia riconducibile a questo. Rimangono da analizzare altre branche ed altri settori scientifici e produttivi (dall'elettrotecnica al petrolio, ecc.). Tuttavia riteniamo che il fattore suddetto sia quello preminente nel determinare almeno le caratteristiche di fondo della nuova prassi scientifica che, ai primi del '900, conduce alle teorie dei quanti e della relatività ristretta.

Più specificamente, l'ipotesi di fondo da cui siamo partiti consiste nel fatto che con la seconda rivoluzione industriale e l'avvio della fase imperialistica del capitalismo si determina nella scienza una profonda modificazione strutturale la quale, maturata attraverso un processo non lineare ma contraddittorio e lacerante, è alla radice di quella che viene definita come una « rivoluzione della fisica », ovvero la formulazione della teoria dei quanti e della teoria della relatività. Nel quadro delle profonde modificazioni produttive che accompagnano il prodigioso sviluppo economico nei decenni

a cavallo tra i due secoli e del conseguente maturare di nuove esigenze tecniche e culturali si configura un modo nuovo di rapportarsi ai problemi scientifici che trova principalmente in Germania le condizioni per affermarsi. Proprio in questo paese infatti la seconda rivoluzione industriale si sviluppa nel modo più dirompente e nello stesso tempo l'attività scientifica si colloca sui fronti più avanzati anche dal punto di vista metodologico.

Le esigenze nuove e crescenti di integrazione delle realizzazioni scientifiche e dell'innovazione tecnologica più spinta in una struttura produttiva che fa ora di esse uno degli elementi propulsori dello sviluppo, impongono ben presto un cambiamento profondo del ruolo della scienza e quindi del modo di intendere e praticare l'attività scientifica: l'impostazione *riduzionistica* della scienza ottocentesca, consistente nel rifarsi sistematicamente ad una concezione generale della natura e nel ridurre le proprietà dei fenomeni a quelle dei suoi costituenti elementari, viene sostituita da un atteggiamento più aperto e spregiudicato, finalizzato in modo diretto alla necessità di estrarre dall'analisi di specifici fenomeni — particolarmente rilevanti per chi si ponga con una certa ottica nei confronti del quadro fenomenologico e della sua rilevanza produttiva — dei *princìpi fisici* nuovi dai quali dedurre dei risultati immediatamente utilizzabili sul piano pratico.

Un ruolo decisivo in questo quadro sarà svolto dalla grande industria chimica tedesca, in primo luogo quella dei prodotti organici che rappresenta il settore trainante dal punto di vista dell'innovazione tecnologica e del processo di integrazione tra scienza e produzione. Non a caso, come vedremo, la svolta decisiva matura in primo luogo nel campo della ricerca chimica, in modo quasi naturale, mentre le ricerche fisiche sono contrassegnate da profonde contraddizioni interne e da scontri violenti rispetto ai quali le nuove teorie si collocheranno in una posizione originale anche se organicamente connesse a quanto di nuovo è maturato nel mondo della produzione.

È chiaro da quanto si è detto che non abbiamo voluto fare una storia della fisica e neanche ricostruire in tutte le sue articolazioni il rapporto tra sviluppo scientifico e sviluppo delle forze produttive tra '800 e '900. Abbiamo cercato piuttosto di articolare e sviluppare fino in fondo la tesi su esposta, certi di contribuire con questo ad una più profonda comprensione dello sviluppo delle scienze nella loro integralità. La stessa struttura di questo libro deve essere intesa in questa chiave.

Nella prima parte analizziamo il nuovo livello su cui si assesta la scienza sull'onda della ripresa dello sviluppo capitalistico dopo i moti del Quarantotto, in particolare considerando le espressioni più mature e coerenti di questa nuova impostazione: la teoria del campo elettromagnetico, la teoria cinetica dei gas, la teoria atomica in chimica (così come andrebbe analizzata la teoria dell'evoluzione in biologia, ecc.).

Nei tre capitoli che costituiscono la seconda parte del libro si è cercato di mettere concretamente in evidenza i nodi strutturali che legano il successivo sviluppo della scienza alle caratteristiche della seconda rivoluzione industriale in Germania. Si fornisce in primo luogo un quadro delle trasformazioni economiche, produttive e sociali che giustificano questo nome dato al periodo storico in considerazione e si dà poi un particolare rilievo all'analisi del sistema di istruzione tecnico-scientifica in Germania (cap. V), insistendo su tutte quelle caratteristiche che lo differenziano in modo tanto marcato da quello degli altri paesi industrializzati, e della struttura dell'industria chimica tedesca (cap. VI), che costituisce appunto il terreno di coltura per la nascita della nuova scienza ed anche, in particolare, delle nuove teorie fisiche.

Quest'ultimo processo costituisce infine l'oggetto dell'ultima parte del libro. Essa si apre con l'analisi dello scontro epistemologico di fine secolo per terminare con la descrizione dei primi modelli d'atomo proposti all'inizio del nuovo secolo. Qui il nodo centrale è appunto l'abbandono — che si produce nella ricerca chimica in Germania — della priorità della meccanica e dei procedimenti riduzionistici nella prassi scientifica ed il ricorso alla termodinamica come contesto meno vincolante ed atto ad elaborare modelli e concezioni più generali e flessibili: l'effetto più diretto e lampante di questa scelta (ma non il solo) è la nascita della chimica-fisica delle reazioni. Vogliamo sottolineare che nella nostra ricostruzione un ruolo fondamentale — disconosciuto dalle ricostruzioni tradizionali — nella formulazione della teoria dei quanti viene attribuito a Walther Nernst, che pure *non* ne è il fondatore, ma costituisce comunque la confluenza del « filone chimico » sviluppatosi prima della fine del secolo col nuovo « filone quantistico » che del precedente assorbe le caratteristiche nuove di prassi scientifica.

Restano infine da dire poche cose sulla collocazione dei brani originali di alcuni dei protagonisti, scienziati e non,

di questa storia. Abbiamo voluto infatti evitare l'impostazione tradizionale che vede un'antologia di brani separata fisicamente dal contesto di un saggio « introduttivo ». Al contrario abbiamo ritenuto di dovere inserire direttamente la voce dei protagonisti nel vivo del discorso che andavamo svolgendo, da un lato per arricchire, attraverso testimonianze dirette, l'analisi e l'articolazione delle tesi di fondo, dall'altro per una precisa scelta metodologica. Crediamo infatti che una corretta ricostruzione dello sviluppo della scienza; nel senso da noi indicato, non può prescindere da un'analisi critica e per certi versi « tecnica » dello specifico modo di operare dei singoli scienziati; non può limitarsi cioè alla valutazione delle rispettive riflessioni *sulla* scienza o alla interpretazione nella veste di « esperto ». Ci rendiamo conto che questo impone un maggiore sforzo di comprensione da parte del lettore e in questo senso abbiamo inserito in alcune appendici i brani più tecnici o più difficili, insieme ad opportune schede esplicative. Anche quest'ultime d'altra parte non vanno intese come un puro episodio di divulgazione scientifica ma piuttosto come un tentativo di documentare ancora una volta sul piano più direttamente scientifico le caratteristiche della svolta.

Dobbiamo ringraziare molte persone per l'aiuto critico fornitoci nel corso del nostro lavoro e soprattutto per il ruolo da essi avuto in quel processo di maturazione politica e culturale cui si è accennato all'inizio di questa Introduzione. Ci limitiamo però a ricordare i nomi di coloro che più direttamente ci sono stati vicini. In primo luogo R. Livi per il continuo interesse alla stesura di questo saggio, la rilettura critica di esso, innumerevoli consigli. Quindi A. Rossi, E. Donini, C. De Marzo, F. Marchetti per le ripetute discussioni sulle loro ricerche di storia della scienza, che abbiamo ampiamente utilizzato, e S. Craparo per preziosi consigli su molti aspetti rilevanti. Infine F. De Sarlo per la consulenza tecnica ed osservazioni stimolanti riguardanti i capitoli sulla chimica, L. Galgani per importanti notizie sui lavori di Nernst, A. Calderaro per l'aiuto fornitoci nelle traduzioni dal tedesco.

SCIENZA E INDUSTRIA
1848-1915

Parte prima

SCIENZA E POTERE BORGHESE 1848-1873

Capitolo primo

IL « QUARANTOTTO » E LA RIPRESA DELLO SVILUPPO CAPITALISTICO

I.1. « *Uno spettro si aggira per l'Europa* »

Le rivoluzioni del 1848 segnano la fine della fase storica contrassegnata dal tentativo di restaurazione del vecchio regime che le classi aristocratiche e feudali avevano messo in atto in tutta l'Europa dopo la caduta dell'impero napoleonico e il Congresso di Vienna. In questo periodo infatti solo in Gran Bretagna, dove ormai la struttura capitalistica era profondamente radicata, il clima di restaurazione si era fatto sentire in modo più attutito e la riforma elettorale del 1832 aveva anzi portato ad una ulteriore democratizzazione a livello istituzionale [1]; negli altri paesi europei, al contrario, l'aristocrazia terriera aveva ristabilito il proprio potere e ciò aveva portato ad un generale rallentamento dello sviluppo capitalistico. In Francia in particolare si era venuto affermando, con il regno di Luigi Filippo, il predominio di uno strato di alta borghesia finanziaria e lo sviluppo capita-

[1] La riforma aveva infatti aumentato il potere politico degli industriali con una radicale ristrutturazione delle circoscrizioni elettorali, le quali erano fino allora legate ai piccoli borghi medievali e quindi ai centri del potere dell'aristocrazia e dell'alta borghesia terriera.

listico, dopo la splendida parentesi napoleonica, faticherà a riprendersi fino agli ultimi decenni del secolo.

Il progresso delle forze produttive si era così limitato sostanzialmente alla diffusione e alla messa a punto di una tecnologia ormai matura — quella del vapore — in particolare per quanto riguarda i mezzi di trasporto. Il primo tronco ferroviario, tra Liverpool e Manchester, era stato inaugurato nel 1830 con la famosa locomotiva di Stephenson e nel 1850 le reti ferroviarie nazionali ammontano a 10.500 km in Gran Bretagna, 3.000 km in Francia e 5.800 km nei diversi stati tedeschi; la navigazione a vapore inoltre va prendendo piede sempre più rapidamente. Si pongono così le basi per quel consolidamento dei mercati interni che è una condizione necessaria per la ripresa dello sviluppo capitalistico. La Germania ad esempio è ancora divisa, come l'Italia, in una miriade di staterelli, anche se nel 1834 si era riusciti a stabilire una Unione doganale (*Zollverein*) sotto l'egida della Prussia, eliminando almeno quella frammentazione del mercato che costituiva un pesante residuo del passato.

Il tentativo di restaurazione è comunque destinato al fallimento. Il livello raggiunto dalle forze produttive e gli embrioni di rapporti capitalistici ormai introdotti nel modo di produzione dei paesi più progrediti costituiscono dei fattori che entrano presto in conflitto insanabile con le restrizioni imposte da una struttura economica ancora sostanzialmente feudale. I meccanismi economici capitalistici insomma sono ormai irreversibili mentre, d'altro canto, le idee della rivoluzione francese hanno sedimentato nelle nuove classi borghesi una cultura e una capacità egemonica che le porta a rivendicare con forza la direzione effettiva del potere economico e istituzionale. Contemporaneamente un nuovo protagonista sociale si affaccia alla ribalta della storia — il proletariato industriale — il cui peso avrà non poca incidenza nel rovesciare ancora una volta l'*Ancien Régime*. Lo scontro di classe si fa quindi più acuto ed i tentativi di rivolta assumono toni sempre più liberali e democratici.

Nel 1847-48 una grave crisi economica scuote l'Europa e in quasi tutti i paesi il popolo invade le piazze. Tuttavia lo sbocco della rivoluzione, anche ora come in Francia nel 1789, non è affatto un potere popolare o anche solo democratico: molto tempo dovrà ancora passare per giungere a questo. Il vecchio ordine sociale ne risulta comunque definitivamente lacerato e si riaprono gli spazi per l'iniziativa

della borghesia più intraprendente la quale, con la conquista del potere economico, porrà definitivamente le basi per una ripresa massiccia dello sviluppo. Scrive Trotskij nella relazione al III Congresso dell'Internazionale comunista (giugno 1921): « La rivoluzione del 1848 non è stata generata dalla crisi, che non ha fatto altro che darle l'ultimo impulso. Essenzialmente la rivoluzione è stata prodotta dalle contraddizioni tra le esigenze dello sviluppo capitalistico e le catene del sistema sociale e dello stato semifeudale. La rivoluzione esitante del 1848, rimasta a mezza strada, ha tuttavia spazzato i residui del regime delle gilde e della servitù ed ha così allargato il quadro dello sviluppo capitalistico. A queste condizioni, e solo a queste condizioni, l'ascesa del 1851 ha segnato l'inizio di tutta una fase di prosperità capitalistica durata sino al 1873 ».

In Francia sale al potere Napoleone III che, sotto lo splendore esteriore dell'impero e dietro un programma generale di sviluppo capitalistico, prolunga però il dominio di quegli strati sociali che escludono ancora a lungo il paese dagli sviluppi più avanzati; in Germania e in Italia si avviano i processi di unificazione nazionale sotto la guida rispettivamente della Prussia e del Piemonte. Inizia contemporaneamente il declino dell'ormai anacronistico Impero austro-ungarico, costretto tra la pressione esterna della crescente potenza prussiana e quella interna delle tensioni nazionalistiche.

I.2. *La ripresa dello sviluppo capitalistico tra il 1850 e il 1870*

Nel terzo quarto dell'800 la ripresa dello sviluppo industriale nei paesi dell'Europa continentale, tuttora caratterizzato dall'emulazione del modello britannico, si pone esplicitamente l'obiettivo di ridurre il profondo *gap* esistente con la nazione d'oltre Manica, definita in quegli anni come l'« officina del mondo » (cfr. Landes [32], pp. 455-95). Uno dei dati che emergono in questo periodo, e che diventerà il punto di riferimento fondamentale di tutta la nostra analisi successiva, è che si preparano le condizioni per un rapido decollo dell'economia tedesca, il cui sviluppo negli ultimi decenni del secolo assumerà un ritmo impetuoso.

Vengono gradualmente eliminate le persistenti limitazioni

Tab. I.1 - *Sviluppo economico nel terzo quarto del XIX secolo.*

	Miglia di binari	Produzione o consumo di carbone (migliaia di tonnellate metriche)[b]	Capacità di forza-vapore (migliaia di HP)[e]	Produzione di ghisa (migliaia di tonnellate metriche)	Consumo di cotone grezzo (migliaia di tonnellate metriche)
Germania					
1850	3.639	5.100[c]	260	212	17,1
1869	10.834	26.774	2.480	1.413	64,1
1873[a]	14.842	36.392	—	2.241	117,8
Francia					
1850	1.869	7.225	370	406	59,3
1869	10.518	21.432	1.850	1.381	93,7
1873[a]	11.500	24.702	—	1.382	55,4[g]
Regno Unito					
1850	6.621	37.500[d]	1.290[f]	2.249	266,8[f]
1869	15.145	97.066	4.040[f]	5.446	425,8[f]
1873	16.082	112 604	—	6.566	565,1[f]
Belgio					
1850	531	3.481	70	145	10,0
1869	1.800	7.822	350	535	16,3
1873	2.335	10.219	—	607	18,0

[a] Tutte le cifre tedesche relative al 1873 sono gonfiate per l'annessione dell'Alsazia-Lorena; sono viceversa diminuiti i risultati francesi.

[b] Per la Germania, produzione; per il Regno Unito, Francia e Belgio, consumo (il solo paese per il quale i dati sul consumo sono indispensabili è la Francia, che nel 1850 importava quasi il 40% del suo fabbisogno di carbone, e quasi il 30% nel 1869). Per la Germania, produzione del solo carbone fossile normale; a questo andrebbe aggiunta la lignite (7.569.000 tonnellate nel 1869, 9.752.900 tonnellate nel 1873), con un contenuto calorifico pari grosso modo a due noni di quello del carbone fossile vero e proprio.

[c] Stima basata sull'estrapolazione di un rapporto fra produzione prussiana e tedesca di 82 a 100 (il rapporto del 1860). La produzione di carbone della Prussia nel 1850 è indicata in 4.153.000 tonnellate.

[d] Per estrapolazione dai dati post-1854.

[e] Stime soltanto per il 1850 e il 1870 (in base al 1869).

[f] Gran Bretagna, più che Regno Unito.

[g] Un'annata cattiva: nel 1872 il consumo era stato di 80.257 tonnellate.

FONTE: Landes [32], p. 458.

alla iniziativa capitalistica, in particolare per quanto riguarda la costituzione delle società per azioni [2] e in ciò la molteplicità delle giurisdizioni tedesche si dimostra paradossalmente un vantaggio in quanto gli imprenditori possono ottenere dai piccoli stati delle autorizzazioni che vengono invece rifiutate dalla Prussia. Viene contemporaneamente stimolata l'apertura del mercato internazionale; si realizzano una serie di trattati commerciali che aboliscono le rigide norme protezionistiche esistenti tra i diversi paesi, aprendo così una fase di *libero scambio* che durerà grosso modo fino alla crisi economica del 1873, quando si sarà costretti a riconoscere che la dinamica delle libere forze di mercato presenta pericoli mortali per il sistema capitalistico, nella forma di ricorrenti crisi di sovrapproduzione, e i diversi governi ritorneranno allora alla politica protezionistica.

Oltre allo sviluppo delle ferrovie ed al reperimento di nuove fonti di materie prime vengono eliminati altri colli di bottiglia che ostacolano lo sviluppo capitalistico. Sul piano finanziario l'immissione di nuovo oro sul mercato e l'introduzione della carta-moneta aumentano notevolmente le disponibilità monetarie e, con la caduta del saggio di interesse, si espande contemporaneamente il volume del credito. Si tratta di una vera e propria rivoluzione finanziaria la quale si accompagna al parallelo processo di ripresa dello sviluppo industriale e di trasformazione tecnologica della base produttiva. Le banche commerciali per azioni, nate in Gran Bretagna, si diffondono rapidamente sul continente, favorendo una grande mobilità di capitali e una notevole efficienza nell'utilizzazione delle risorse finanziarie [3]. Un'innovazione continentale in questo campo è costituita dalle società finanziarie specializzate negli investimenti industriali, istituzioni preziose in quei paesi dove le grandi possibilità di investimento industriale si accompagnano alla carenza di capitali, come in Germania. È proprio questo paese a presentare in questo campo una capacità di rinnovamento di gran lunga superiore rispetto, per esempio, alla Francia e le banche tedesche mostrano nella concessione dei prestiti una spregiudi-

[2] Un forte impulso deriva ad esempio dalla legge che stabilisce la responsabilità limitata dell'azionista fino all'importo delle azioni da lui possedute.

[3] Notiamo però che in Germania esse non sono mai state responsabili di più del 25% del credito bancario totale (Borchardt [38], p. 150).

catezza che è pari alla lungimiranza ed alla volontà di rinnovamento degli imprenditori affamati di credito. L'ampia disponibilità di credito così generata spiega in parte l'impetuoso sviluppo della Germania dopo il 1870, anche se la limitata liquidità creerà ancora degli inconvenienti.

Ma non è questo il solo settore in cui la Germania mostra un maggiore dinamismo. In agricoltura ad esempio gli *Junker*, orgogliosi proprietari terrieri prussiani, controllano nelle grandi pianure dell'Europa orientale un tipo di proprietà che si presta particolarmente all'adozione di tecniche moderne per la produzione agricola. La particolarità del progresso dell'agricoltura tedesca consiste proprio nel fatto che l'innovazione è realizzata dalla vecchia classe dirigente e questo condizionerà la successiva evoluzione della struttura produttiva e della vita politica del paese.

La Germania colma il suo ritardo economico a grandi passi. Nel 1860 essa estrae il 50% di carbone in più rispetto alla Francia e se anche il rapporto è ancora invertito per quanto riguarda il ferro, nei dieci anni successivi le guerre combattute dalla Prussia contro la Danimarca, l'Austria e la Francia costituiscono uno stimolo potente per l'espansione: alla vigilia della guerra franco-prussiana (che frutterà al nuovo impero tedesco la ricca regione dell'Alsazia-Lorena) la produzione metallurgica tedesca supera ampiamente quella francese.

Al di là però delle realizzazioni di questo ventennio è estremamente significativa la diffusione in Germania di una mentalità capitalistica di tipo moderno per cui si fanno strada da un lato l'opinione che l'aumento del profitto capitalistico e la prosperità del sistema dipendono non tanto dall'aumento dello sfruttamento quanto dall'aumento della produttività del lavoro e quindi dal progresso delle scienze e dai livelli di istruzione, d'altro lato il progetto, strettamente connesso, di uno sviluppo produttivo fondato su una forza lavoro qualificata, da responsabilizzare e coinvolgere nella gestione della produzione.

I.3. *Innovazione tecnologica e nuovi processi industriali*

Dal punto di vista delle innovazioni tecnologiche i decenni di mezzo dell'800 sono caratterizzati da un lato dal miglioramento e dall'ulteriore diffusione del patrimonio tecnologico

ereditato dalla generazione precedente e dall'altro dall'introduzione di nuove tecniche e di nuovi processi industriali che pongono le basi per un rilancio produttivo di tipo completamente nuovo e che troveranno piena utilizzazione solo negli ultimi decenni del secolo.

La macchina a vapore raggiunge ora la piena maturità tecnica e la sua utilizzazione diventa possibile e necessaria in tutte le lavorazioni industriali. Un altro settore in rapida evoluzione è quello dell'industria metallurgica, in cui il carbon fossile trionfa definitivamente sul carbone di legna. La fusione a coke, già da tempo affermatasi in Gran Bretagna, sostituisce rapidamente i vecchi procedimenti anche in Belgio, Francia, Germania intorno alla metà del secolo.

Realizzazioni fondamentali si registrano nella produzione dell'acciaio: questo metallo, che non è altro che ferro contenente una piccola percentuale di carbonio, sarà uno dei pilastri dello sviluppo dell'industria moderna. Il primo procedimento standard era stato introdotto verso la metà del '700 dall'inglese Huntsman per la produzione di acciaio fuso al crogiolo, all'interno del quale avveniva appunto sia la fusione che la raffinazione del metallo. Il metodo è tutt'oggi in uso, ma solo per la produzione di acciai speciali (poiché si presta a dosare esattamente gli ingredienti), essendo un processo laborioso e costoso. Per tutta la prima metà dell'800 non si erano poi registrate innovazioni sostanziali e nel 1850 la produzione britannica complessiva non superava le 60.000 tonnellate. Nel 1856 l'inglese Bessemer introduce una fondamentale innovazione (vi giunge indipendentemente anche l'americano Kelly, che però la bancarotta elimina immediatamente): la motivazione è la costruzione di proiettili per cannoni, che richiedono un acciaio particolarmente buono. Il metodo consiste nel raffinare la ghisa (il cui contenuto di carbonio è più elevato che nell'acciaio) soffiando aria attraverso il metallo fuso, ottenendo così la combustione del carbonio contenuto in esso. Il processo si fa avvenire all'interno di un opportuno recipiente, detto *convertitore*, e consente di ottenere la decarburazione con grande rapidità. Il metodo non è privo di inconvenienti: primo fra tutti — come ci si avvede in seguito — esso richiede minerale senza tracce di fosforo, che non si riesce ad eliminare con le altre scorie non consentendo così di ottenere l'acciaio. Nel corso degli anni '60 uno dei Siemens (la famiglia tedesca cui appartengono anche i noti industriali elettrici) e il francese Martin appor-

tano notevoli miglioramenti al processo con il recupero del calore e quindi risparmio di combustibile, ma non risolvono il problema del fosforo. Su questa base, comunque, la metallurgia britannica riceve un grande impulso e negli anni '70 la Gran Bretagna produce più di metà dell'acciaio ottenuto con questo procedimento dai quattro maggiori paesi industriali dell'Europa occidentale, mentre per quanto riguarda la produzione mondiale, questa si aggira nel 1870 sulle 500.000 tonnellate annue. In Germania lo sviluppo della produzione di acciaio si scontra con il fatto che il paese dispone principalmente di minerale fosforico. La soluzione di questo problema verrà alla fine degli anni '70 dagli inglesi Thomas e Gilchrist, ma l'innovazione verrà sfruttata soprattutto in Germania. Di conseguenza, nel corso del prodigioso sviluppo degli ultimi decenni del secolo, si rovescerà nel giro di pochi anni la precedente situazione europea.

Si sviluppa contemporaneamente il processo di meccanizzazione dell'industria tessile, non soltanto per quanto riguarda la filatura e la tessitura, ma anche per le confezioni: la macchina da cucire viene infatti inventata dall'americano Singer nel 1851.

Strettamente connessa all'industria tessile è infine l'evoluzione dell'industria chimica, le cui caratteristiche sono peraltro ben diverse. La produzione tessile, infatti, non dipende soltanto dal movimento di un insieme ben regolato di dispositivi meccanici, ma anche da una serie di trattamenti chimici, il principale dei quali è il candeggio (operazione che ha lo scopo di liberare le fibre tessili dalle sostanze coloranti naturali) e la successiva colorazione dei tessuti. Ma se un abile operaio o un tecnico esperto possono con relativa facilità visualizzare e migliorare le diverse parti di una macchina, per operare nel campo della chimica sono necessarie ben altre competenze integrate e livelli di istruzione.

L'industria chimica era nata di fatto nel vivo della prima rivoluzione industriale sotto la spinta di esigenze poste da altri settori produttivi, oltre alla manifattura tessile, l'industria del vetro e quella del sapone. Nota Landes: « La trasformazione della manifattura tessile, il cui fabbisogno di detersivi, decoloranti e mordenti cresceva di conserva con la produzione, sarebbe stata impossibile senza una corrispondente trasformazione della tecnologia chimica. Non c'erano in tutte le isole britanniche abbastanza prati a buon mercato o latte acido per candeggiare i tessuti del Lancashire una

volta che filatoio idraulico e " mula "[4] ebbero sostituito la ruota da filare; e ci sarebbero volute quantità inimmaginabili di orina umana per sgrassare la lana greggia dei lanifici del West Riding » (Landes [32], p. 363). Si trattava di un vero e proprio collo di bottiglia, dal momento che il processo di candeggio dei tessuti richiedeva nel '700 una lunga esposizione al sole e all'aria (per diverse settimane o mesi) e un bagno di qualche giorno nel siero di latte acido. Tale strozzatura era stata eliminata grazie all'invenzione del metodo delle camere di piombo per la produzione su larga scala di acido solforico[5], uno dei prodotti chiave per l'industria nel suo complesso, e all'invenzione del detersivo in polvere a base di cloro[6]. Entrambe le scoperte erano maturate nell'ambito della più avanzata frontiera scientifica e tecnologica della seconda metà del '700, cioè gli ambienti scientifici e industriali inglesi e scozzesi.

Il settore decisamente trainante di tutta l'industria chimica per gran parte dell'800 rimane quello della produzione degli « alcali ». Con tale termine si denotano il carbonato di potassio (*potassa*) e il carbonato di sodio (*soda*), i quali trovano largo impiego in svariate applicazioni, dal candeggio dei tessuti alla fabbricazione dei saponi, all'industria del vetro e della polvere da sparo. Anche in questo caso l'aumento della domanda determinato dallo sviluppo industriale imponeva la ricerca di alternative rispetto alle tradizionali fonti di approvvigionamento di queste sostanze: ceneri di legno e di alcuni tipi di piante e alghe marine. Dopo anni di tentativi la soluzione era stata trovata nel 1790 dal francese Nicolas Leblanc, il quale aveva brevettato un processo per la preparazione della soda a partire da sale da cucina e acido solforico (la cui produzione aveva ricevuto di conseguenza

[4] È il nome che era stato dato ad uno dei filatoi meccanici inventati nel '700 in Inghilterra.

[5] L'innovazione è dovuta a J. Roebuck e S. Garbett, che sostituiscono appunto con recipienti di piombo le camere di vetro in cui l'acido veniva ottenuto bruciando zolfo in presenza di salnitro e successivamente concentrato mediante distillazione. Il primo impianto di tipo industriale con un tale metodo è del 1749, ma il procedimento venne successivamente perfezionato da Gay-Lussac.

[6] Il cloro fu scoperto nel 1774 dallo svedese K. Scheele e le sue proprietà sbiancanti furono studiate dal chimico francese C. L. Berthollet. Nel 1796 fu inventata in Francia la cosiddetta *acqua di Javel* (ipoclorito di potassio), ma il progresso più importante si ebbe nei due anni successivi con l'invenzione della polvere sbiancante (cloruro di calcio) da parte di C. Tennant e C. MacIntosh.

un grande impulso). I grandi impianti costruiti in Francia e in Gran Bretagna per la produzione di soda Leblanc costituivano i centri intorno a cui ruotavano tutti i settori minori dell'industria chimica fino a quando, negli ultimi decenni dell'800, incomincia ad essere introdotto su larga scala un nuovo processo, dovuto a Solvay. La reazione chimica che è alla base di esso era conosciuta da tempo e le difficoltà erano essenzialmente di carattere tecnico. I composti di partenza sono infatti ammoniaca (NH_3) e cloruro di sodio (Na Cl), il comune sale da cucina, dai quali è possibile ottenere bicarbonato di sodio e cloruro di ammonio secondo le reazioni:

$$NH_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow NH_4HCO_3$$

$$NH_4HCO_3 + NaCl \rightarrow NaHCO_3 + NH_4Cl$$

Dal primo è possibile ottenere la soda per riscaldamento e in più biossido di carbonio e acqua, che ritornano in circolo:

$$2NaHCO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + CO_2 + H_2O$$

Il problema consisteva nella necessità di recuperare l'ammoniaca, composto prezioso in quei tempi, dal cloruro di ammonio [7]. Decine di tecnici e scienziati e ingenti somme di denaro vengono impegnati per la soluzione pratica del problema, finché il belga E. Solvay non la trova nel 1863, fondando l'anno successivo l'industria che ancora oggi porta il suo nome. Il metodo diviene però realmente competitivo rispetto al processo Leblanc solo verso la metà degli anni '70, in seguito ad ulteriori miglioramenti tecnici. Vedremo successivamente come anche e soprattutto in questo campo la nascente industria chimica tedesca saprà avvalersi delle nuove tecniche e rovesciare i rapporti di forza nei confronti del colosso britannico.

Si muovono anche i primi passi decisivi nel campo della chimica organica. Già la sintesi dell'urea, realizzata dal tedesco Wöhler nel 1828, aveva aperto una breccia significativa nel muro che tradizionalmente separava la chimica dei corpi inanimati da quella delle sostanze che intervengono nella

[7] L'ammoniaca può essere recuperata ad esempio mediante la reazione

$$2NH_4Cl + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCl_2 + 2NH_3 + 2H_2O.$$

Il $CaCl_2$ è un candeggiante utile.

materia vivente. La sintesi del primo colorante artificiale (Perkin 1856) segna l'avvio di un settore che risulterà determinante sia per i progressi scientifici della chimica sia per lo sviluppo di una industria che assumerà anche in questo caso dimensioni e caratteristiche del tutto nuove e rivoluzionarie soprattutto in Germania.

Più in generale si può dire che lo sviluppo di questa nuova industria chimica si configura come il prodotto di scoperte scientifiche e innovazioni tecnologiche che nella loro articolazione sono in grado di fornire nuove merci sul mercato dei mezzi di produzione. L'organizzazione scientifica della produzione assume poi in Germania caratteristiche spiccatamente d'avanguardia determinando già in questi anni una maggiore versatilità dell'industria tedesca. In una pubblicazione tedesca del 1851 leggiamo: « la maggior parte dei nostri fabbricanti chimici sono in condizione (grazie ad un'educazione scientifica molto più solida e alla facilità con la quale [possono attingere] sia alle nostre schiere di farmacisti, le cui nozioni scientifiche vanno ben al di là di quelle degli apotecari di altri paesi, sia al gran numero di altri giovani chimici) di ottenere in ogni momento un'assistenza di cui raramente, e solo con grande spesa, si può disporre altrove. E questa circostanza consente loro di realizzare, insieme ai prodotti di più largo smercio, moltissimi preparati che possono essere affidati soltanto a persone di studio e di esperienza » (Landes [32], p. 449).

Ritorneremo ampiamente su questi temi nel cap. VI.

I.4. *Un ventennio di transizione*

Si può definire questo periodo, che va grosso modo dal 1850 al 1870, come un ventennio di transizione: nel corso di quegli anni si assiste infatti al definitivo consolidamento delle strutture capitalistiche ed alla diffusione delle realizzazioni della *prima rivoluzione industriale*. Negli anni euforici del libero scambio e del capitalismo concorrenziale tutta una fase storica arriva insomma alla sua piena maturazione, mentre si pongono al tempo stesso le basi per un ulteriore salto qualitativo. Nell'assestamento dei nuovi rapporti di produzione e di classe vengono forgiate quelle forze produttive che saranno indispensabile premessa per la *seconda rivoluzione industriale*, negli ultimi decenni del secolo. Si afferma

anche, e lo vedremo in dettaglio nei prossimi capitoli, una metodologia scientifica adeguata a compiti sconosciuti nel passato.

Si plasma una struttura produttiva assai diversa da quella tradizionale, le cui caratteristiche sono destinate ad accentuarsi nel corso dei decenni successivi. Prende l'avvio un processo di concentrazione produttiva e insieme una redistribuzione spaziale dei centri di produzione intorno ai nuovi giacimenti di ferro e di carbone. Il Nord della Francia intorno al Pas-de-Calais, le regioni nord-orientali e nord-occidentali della Gran Bretagna, la Westfalia in Germania con la loro distesa di ciminiere e l'aria densa di carbone diventano il simbolo di una nuova èra, mentre nascono le grandi aziende destinate a dominare il panorama industriale tra '800 e '900. Nelle officine Krupp di Essen lavorano 76 operai nel 1847, e diventeranno 1.000 dieci anni dopo, 8.000 nel 1865, 20.000 nel 1887. Nel 1863 viene fondata la Società Solvay in Belgio e nel 1865 la Badische Anilin- und Soda-Fabrik (BASF), uno dei futuri giganti della chimica.

Vengono istituite in questo periodo le Esposizioni universali, come momenti importanti di confronto dei progressi tecnici e industriali dei diversi paesi. La prima si tiene a Londra nel 1851 e viene visitata da 6 milioni di persone. Il predominio della Gran Bretagna è ancora assoluto, anche se gli Stati Uniti si fanno notare per la macchina da cucire, per i primi esempi di fabbricazione di macchine e strumenti con pezzi intercambiabili (soprattutto piccole armi), per la mietitrice meccanica di McCormick, salutata dal « Times » come « il contributo più notevole dall'estero [...] degno dell'intero costo dell'Esposizione ».

Nel 1867, all'Esposizione universale di Parigi, la situazione si presenta profondamente mutata: l'Inghilterra deve per la prima volta confrontarsi con i progressi tecnologici realizzati negli altri paesi, e in primo luogo in Germania, i cui espositori vincono buona parte dei premi messi in palio. Non è che l'inizio di un'egemonia tecnologica destinata ad affermarsi definitivamente e a rafforzarsi nel corso dei decenni successivi.

Capitolo secondo

UN NUOVO LIVELLO NELL'INDAGINE SCIENTIFICA

II.1. *La scienza del periodo positivistico*

Nel quadro della ripresa dello sviluppo capitalistico nella seconda metà dell'800 anche la scienza subisce una svolta nei metodi e nei contenuti rispetto alla prassi che si era realizzata nel periodo precedente.

Nei primi decenni del secolo in effetti si era compiuta in Inghilterra ed avviata in Francia la prima fase del processo di industrializzazione, ma dopo lo slancio del periodo napoleonico l'industria si era assestata sui livelli tecnologici raggiunti, limitandosi ad estenderne le applicazioni.

In quella fase la produzione scientifica e l'innovazione tecnica erano state affidate principalmente all'ingegnosità e allo spirito d'iniziativa dei singoli, in un contesto produttivo che vedeva ancora un rapporto di subordinazione della scienza rispetto alla tecnica. In conseguenza di ciò si erano delineati con sufficiente precisione ed autonomia i diversi campi di indagine dei fenomeni naturali portati alla ribalta dal progresso tecnico (calore, elettricità, chimica, ottica, ecc.) e lo scopo dell'attività scientifica era posto essenzialmente nella razionalizzazione e nella matematizzazione di tali fenomeni. Prefiggendosi il compito di controllare quantitativamente i processi che erano alla base delle nuove tecnologie, la nuova scienza « borghese » e progressista dichiarava esplicitamente la necessità di limitarsi ai fatti dell'esperienza e rifiutava programmaticamente il ricorso ad ipotesi di carattere metafisico. Il positivismo, come nuova filosofia scientifica, definisce in quegli anni questo nuovo ideale conoscitivo [1].

[1] Teniamo a precisare che a questo livello stiamo compiendo una grossa, ma necessaria schematizzazione. Il termine « positivismo » è qui usato per denotare un movimento indubbiamente complesso e multiforme. Ci sembra però anche che gli aspetti che noi (forse unilateralmente)

Il successivo irrigidimento dei rapporti di produzione durante la Restaurazione aveva poi bloccato la possibilità di un superamento qualitativo di tale ambito di « sperimentazione possibile » e aveva determinato in sostanza l'esaurimento della fase « rivoluzionaria », anche in campo scientifico, del periodo precedente. Se infatti lo sviluppo delle forze produttive si era sostanzialmente assestato su ritrovati tecnologici ormai maturi, era però anche sorta — soprattutto nel sistema tecnocratico del periodo napoleonico — l'esigenza pressante di un inquadramento rigoroso dei fenomeni noti e utilizzati, che consentisse lo sfruttamento più razionale e il massimo perfezionamento di quelle tecnologie. Da un lato questo si era tradotto in un'esigenza di rigore scientifico, in un uso dell'apparato matematico sconosciuti per l'appunto alla scienza fondamentalmente empirica del '700, mentre dall'altro l'assenza di spinte reali e decisive per un salto qualitativo nello sviluppo delle forze produttive si era espressa nel continuo richiamo alla fedeltà ai « fatti »: la loro scrupolosa e rigorosa descrizione e formalizzazione, il rifiuto di qualsiasi ipotesi che andasse al di là di essi erano divenuti garanzie contro sconfinamenti metafisici che avrebbero compromesso l'utilizzazione sicura dei fenomeni indagati.

Se prendiamo come esempio la scienza francese, particolarmente brillante in quel periodo per il nuovo spirito che si era diffuso soprattutto negli ambienti dell'Ecole Polytechnique,

mettiamo in luce siano quelli di fondo, cui è necessario riferirsi per una collocazione storica corretta delle manifestazioni scientifiche e culturali, dei rapporti produttivi (e quindi dell'atteggiamento nei confronti dei fenomeni naturali e tecnici) propri di quest'epoca.

Occorre anche dire che forti influssi romantici si erano diffusi in quegli anni un po' in tutta l'Europa e non mancavano di influenzare, spesso profondamente, molte elaborazioni scientifiche e manifestazioni culturali. Infine non si può disconoscere che precise ipotesi o idee teoriche di fondo avevano guidato spesso il lavoro di molti scienziati di questo periodo: ciò mostra che l'ideale positivistico era certamente riduttivo e irrealizzabile, ma non contraddice affatto la nostra analisi. Quelle idee teoriche erano finalizzate in sostanza all'inquadramento di fatti sperimentali — come l'ipotesi molecolare di Avogadro e Ampère e la teoria di quest'ultimo sulla natura del magnetismo in base alle correnti molecolari — oppure rimanevano elaborazioni marcatamente modellistiche, cui mancava la matematizzazione e la trattazione formale (come in Faraday). Tali atteggiamenti non intaccano quindi il modo fondamentalmente subordinato con cui gli scienziati dell'epoca si rapportavano al livello di indagine naturale delimitato dallo sviluppo raggiunto dalle forze produttive.

possiamo registrare l'enorme progresso che era derivato da quell'impostazione [2]. Con il rapido avvio dell'industrializzazione, la tradizione razionalistica e matematizzante della scuola illuministica francese si era fusa con le acquisizioni della scienza e della tecnica empiristiche inglesi. Si guardava ai fatti empirici con lo scopo esplicito di esprimerne le leggi in forma matematica al fine di comprenderli e controllarli, senza utilizzare alcuna ipotesi non immediatamente e direttamente verificabile.

J. Fourier (1768-1830) ad esempio — indicato da Comte come il prototipo dello scienziato positivista — aveva indagato la forma matematica delle leggi della propagazione del calore, quali si mostrano all'esperienza diretta.

> [...] le cause prime ci sono ignote; ma sono soggette a leggi semplici e costanti, che possono essere scoperte tramite l'osservazione, il cui studio costituisce l'oggetto della filosofia naturale.
> Il calore, come la gravità, penetra ogni sostanza dell'universo, i suoi raggi occupano tutte le parti dello spazio. L'oggetto del nostro lavoro è di stabilire le leggi matematiche a cui questi elementi ubbidiscono. [...]
> Ho dedotto queste leggi da uno studio prolungato e da un confronto attento dei fatti noti fino ad oggi: ho osservato tutti questi fatti di nuovo nel corso di molti anni con gli strumenti più esatti esistenti a tutt'oggi. [...]
> La spiegazione fisica di molti di questi fatti è già nota; la teoria matematica che ho formulato fornisce una misura esatta di essi. Essa consiste, in un certo senso, in una nuova catottrica [3] che ha i suoi propri teoremi, e serve a determinare per mezzo dell'analisi tutti gli effetti diretti o riflessi del calore. [...]
> Le equazioni differenziali della propagazione del calore esprimono le condizioni più generali, e riducono i problemi fisici a problemi di pura analisi, e questo è il vero obiettivo della teoria. [Fourier (154)]

[2] La scienza inglese di questo periodo presenta alcune differenze profonde che si ricollegano alla forte tradizione empiristica ed al peso esercitato anche negli ambienti scientifici ufficiali da tecnici e ingegneri direttamente legati al mondo della produzione (una tradizione, anche questa, tipica dell'Inghilterra fin dal secolo precedente).

[3] È quella parte dell'ottica che studia la riflessione della luce su superfici speculari.

Analogamente A. Cauchy (1789-1857) aveva elaborato la teoria matematica dell'elasticità e S. D. Poisson (1781-1840) quella del potenziale elettrostatico. Si erano sviluppati inoltre i primi studi di elettrodinamica grazie soprattutto ad A. M. Ampère (1775-1836), la cui impostazione metodologica è testimoniata tra l'altro dal profondo legame che nelle sue ricerche sussiste tra il momento dell'esecuzione manuale delle misure e quello della concettualizzazione: il modo in cui si esprimono (e in cui si deducono) le leggi dell'azione tra fili percorsi da corrente elettrica rispecchia fedelmente le modalità della progettazione dell'apparato sperimentale e dell'esecuzione stessa delle misure.

Si può dire in definitiva che la caratteristica principale dello sviluppo scientifico nella prima metà dell'800 è la nascita e la specializzazione di diverse branche scientifiche in connessione con i problemi industriali e tecnologici dominanti. In particolare il secolo del vapore esigeva la sistemazione dei problemi relativi al funzionamento delle macchine termiche. In questo contesto si inquadra l'opera di Sadi Carnot (1796-1832) anche se, nel generale clima di rallentamento del progresso scientifico che si era accompagnato al periodo della Restaurazione, il suo lavoro rimase praticamente sconosciuto. Nel 1824 egli si era posto per la prima volta in modo sistematico il problema di fornire una spiegazione generale del funzionamento delle macchine termiche, con lo scopo dichiarato di trovare le condizioni per ottenere il rendimento massimo, ed era giunto così, nell'opera *Reflexions sur la puissance motrice du feu*, alla prima formulazione di quello che diverrà in seguito il *secondo principio della termodinamica.* Benché i problemi termodinamici avessero continuato a dominare sia il panorama fenomenologico che gli sforzi tecnici, le idee di Carnot vengono riconsiderate solo negli anni '50, nel clima di ripresa dello sviluppo produttivo. Nel decennio precedente intanto era maturata simultaneamente in molti scienziati la convinzione dell'equivalenza tra lavoro e calore, destinata poi a essere generalizzata a *primo principio della termodinamica*, il quale ingloba e unifica nel concetto di energia e nel principio della sua conservazione nei processi fisici una serie di fenomeni relativi a campi diversi della fisica.

È così che la termodinamica si avvia a conquistare quella preminenza nella elaborazione scientifica che ritroveremo poi fino ai primi del '900, anche se con ruoli e impostazioni profondamente diversi, e che costituirà uno dei punti di riferi-

mento fondamentali della nostra analisi: mentre qui la termodinamica dominava il panorama fenomenologico emergendo direttamente dall'immediatezza dei problemi tecnici da sistemare o risolvere, alla fine del secolo essa inquadrerà in modo più mediato le problematiche di punta e fungerà, ad un livello molto più formale, da guida metodologica generale nell'elaborazione di un modo di fare scienza e di rapportarsi alla natura adeguato ad esigenze completamente nuove.

II.2. *La svolta del ventennio 1850-70*

Nel clima di trasformazione dei rapporti sociali e di ripresa produttiva che matura rapidamente dopo la metà del secolo, il tipo di metodologia scientifica e di rapporto tra l'uomo e la natura che abbiamo illustrato si mostra ben presto inadeguato. Non intendiamo certo sostenere che vi sia un legame diretto e meccanico — di causa-effetto — tra l'apertura di nuovi spazi a livello produttivo e sociale e le trasformazioni nella prassi scientifica. È vero comunque che nel generale clima di ripresa produttiva si fanno strada decisamente nuove esigenze di carattere tecnologico ed un atteggiamento culturale più aperto e spregiudicato che portano con sé un nuovo ideale conoscitivo: matura insomma l'esigenza di un modo nuovo di concepire e praticare l'attività scientifica nell'ambito di un rapporto tra l'uomo e la natura che si va trasformando rapidamente.

Il dinamismo che comincia ad animare ora i rapporti sociali spinge ad un salto qualitativo nello sviluppo delle forze produttive che, anche se si verificherà pienamente solo negli ultimi decenni del secolo, fa sentire fin da ora il suo influsso sul livello dell'indagine scientifica. Se il punto di partenza rimane per il momento ancora legato alle acquisizioni tecnologiche già collaudate, matura tuttavia la spinta a non arrestarsi al solo orizzonte fenomenologico in cui queste si iscrivono e a spingersi piuttosto al di là di esso, forgiando nuovi strumenti concettuali ed abbandonando ogni residua prevenzione nei confronti delle ipotesi.

Non si tratta affatto, si badi, di un ritorno a congetture di tipo metafisico, non verificabili ed arbitrarie, quali avevano caratterizzato le speculazioni della filosofia della natura settecentesca. Ipotesi e modelli, della cui arbitrarietà si è pienamente consci, vengono ora assunti consapevolmente come naturali congetture che travalicano i meri fatti empirici, ma che

proprio per questo sono in grado di « predire » nuovi ordini di fenomeni o connessioni insospettate tra di essi, suscettibili però di verifica sperimentale ed in grado quindi di indicare nuove vie allo sviluppo delle forze produttive. Se la verifica contraddice le previsioni, l'ipotesi o il modello sono da rigettare; se le conferma, si dispone allora di uno strumento molto potente di indagine della natura, capace di metterne in luce aspetti che sfuggono all'osservazione immediata.

Si tratta sempre di modelli che si esprimono matematicamente (anche se mantengono — ancora in questa fase — un fondamento meccanico intuitivo), ma la loro elaborazione configura per la prima volta un campo di attività specifico per il « fisico teorico », ponendo le premesse per una frattura tra questa attività e quella del « fisico sperimentale », fino a realizzare una vera e propria « divisione del lavoro » che spezza quell'unità che aveva caratterizzato i decenni precedenti e che abbiamo sottolineato, per esempio, nell'opera di Ampère. Le due attività potranno ancora convivere eccezionalmente in un unico scienziato (Enrico Fermi è l'esempio più recente), ma esse saranno profondamente separate e differenziate sul piano metodologico.

Come esempi di questa nuova prassi scientifica si possono portare due teorie fisiche, le quali — nel corso dei due decenni che stiamo considerando — maturano proprio sulla base dell'impostazione nuova che abbiamo delineato: la teoria del campo elettromagnetico e la teoria cinetica dei gas, che vengono così a costituire nel volgere di pochi decenni l'ossatura di quella concezione generale dei fenomeni naturali su base meccanicistica [4] che oggi si identifica con il nome di « fisica classica ».

II.3. *La sistemazione dell'elettromagnetismo e l'opera di J. C. Maxwell*

Il principale artefice della sistemazione dell'elettromagnetismo è l'inglese James Clerk Maxwell (1831-1879) [8]. Intorno alla metà dell'800 la situazione, per quanto riguarda i feno-

[4] In realtà — come avremo occasione poi di vedere meglio — il *meccanicismo* è solo un aspetto dell'impostazione scientifica propria della seconda metà dell'800. Identificheremo invece l'aspetto di fondo in quello che chiameremo il *riduzionismo* di questa scienza: la conce-

meni elettromagnetici, è piuttosto confusa. Da un lato si dispone di un vasto panorama di informazioni e dati sperimentali e di leggi matematiche (la scuola francese ha chiarito le interazioni tra fili percorsi da correnti e tra correnti e magneti; Faraday ha indagato il fenomeno dell'induzione elettromagnetica; Ohm ha precisato le leggi dell'intensità della corrente elettrica e il concetto di resistenza elettrica; ecc.); dall'altro si ha però uno spettro molto ampio di impostazioni teoriche diverse e spesso contrastanti (basti qui ricordare le spiegazioni in termini di azione a distanza proprie della scuola francese e quelle, invece, in termini di campo e di azioni di contatto proposte dalla scuola britannica [5]). Un forte impulso verso la sistemazione organica di tutta la materia proviene ora d'altra parte, soprattutto in Gran Bretagna, dalla nascente industria elettrica, la quale costituisce un aspetto di fondo di quel salto *qualitativo* nello sviluppo delle forze produttive e nell'innovazione tecnologica che ha luogo nel nuovo clima di rapporti sociali: nel corso degli anni '30 erano state chiarite infatti le basi fisiche per la realizzazione del motore elettrico e del telegrafo e nel 1858 si ha la posa del primo cavo transatlantico, sotto la direzione di Lord Kelvin.

Da questo punto di vista è emblematico lo stesso *Trattato sull'elettricità e il magnetismo* che nel 1873 rappresenta il coronamento degli studi di Maxwell e la formulazione più organica della teoria. Nella Prefazione alla prima edizione del 1873 si legge infatti:

> Le importanti applicazioni dell'elettromagnetismo alla telegrafia hanno anche reagito sulla scienza pura con l'attribuzione di un valore commerciale alle misure elettriche di precisione e con la possibilità offerta agli elettrotecnici di utilizzare apparati su una scala che trascende largamente quella di un qualsiasi laboratorio. La conseguenza di questa domanda di conoscenze sull'elettricità e di questa possibilità sperimentale di acquisirle sono già state molto grandi, sia nello stimolare le energie degli elettrotecnici, sia nel diffondere tra i tecnici un livello accurato di conoscenze: cosa

zione dei fenomeni naturali secondo la quale questi devono sempre essere ricondotti alle interazioni tra i costituenti ultimi della materia, interazioni che non verranno sempre e soltanto assunte come meccaniche (cfr. a questo proposito il cap. VII).

[5] Per una discussione più approfondita lungo le linee interpretative qui adottate rimandiamo ad esempio al saggio di A. Baracca e R. Livi [7].

che è estremamente favorevole per produrre il progresso scientifico generale dell'intera professione dell'ingegnere. [Maxwell (177), p. VII]

Il distacco di Maxwell dal metodo fenomenologico caratteristico degli scienziati della prima metà del secolo è esplicito fin dai primi lavori. Il suo obiettivo infatti non è più quello di fornire una *descrizione matematica* dei diversi fenomeni, ma piuttosto quello di costruire un modello fisico e quindi una *teoria matematica* complessiva e unitaria che da poche leggi fondamentali faccia discendere tutte le proprietà osservate ed altre ne lasci prevedere.

Il metodo con cui una teoria di questo tipo viene costruita costituisce una caratteristica dell'impostazione di Maxwell che ritroveremo ancora nei suoi lavori sulla teoria cinetica. Il punto di partenza consiste nel riconoscimento di *analogie fisiche* tra fenomeni diversi, che sono rivelate dalla somiglianza tra le leggi matematiche che li descrivono. « Per analogia fisica intendo la somiglianza parziale tra le leggi di una scienza e quelle di un'altra le quali fanno sì che una di esse illustri l'altra. » (Maxwell [173]). Già W. Thomson (Lord Kelvin) aveva messo in luce analogie di questo tipo e in particolare la possibilità di trattare con un'analoga impostazione matematica il moto di un fluido meccanico, la trasmissione del calore e certi fenomeni elettrici. In Maxwell si ha però un deciso salto di qualità in quanto la ricerca di analogie fisiche significative diventa un metodo di indagine sistematica sui meccanismi comuni che possono pensarsi alla base dei diversi fenomeni e quindi il punto di partenza per la costruzione di un *modello* generale che trascenda gli aspetti immediati dei fenomeni stessi. Se tale obiettivo viene realizzato si dispone così di un potente strumento per allargare il controllo dell'uomo sulla natura. Vale la pena di sottolineare come un tale modo di procedere, comune a tutta la « nuova fisica teorica » di questo periodo, non è più visto come una concessione alla metafisica ed alla pura speculazione. La scienza di cui Maxwell è interprete si pone — sotto la spinta alla ricerca di forze produttive nuove — obiettivi diversi da quelli dei decenni passati. Il modello idrodinamico per i fenomeni elettrici ad esempio, pur non essendo di per sé una novità assoluta, lo diventa invece nel momento in cui viene trattato matematicamente ed esteso al punto di abbracciare in maniera unitaria e coerente non singoli aspetti ma tutto l'insieme dei fenomeni elettromagnetici.

Partendo da tale analogia infatti, Maxwell si propone di precisare, anche dal punto di vista microscopico, quale tipo di fluido e quali stati di pressione, tensione, torsione di esso possono essere associati al campo elettromagnetico, in modo da rendere conto di tutte le sue manifestazioni fisiche, quelle note e soprattutto quelle non ancora messe in luce (come sarà nel caso delle onde elettromagnetiche).

In due prime memorie, tra il 1855 e il 1862, Maxwell pone le basi del suo modello del campo elettromagnetico [173; 174], rifacendosi esplicitamente alle concezioni di Faraday e contrapponendosi invece esplicitamente e consapevolmente alla scuola continentale (Ampère, Biot, Savart), che aveva impostato i medesimi problemi in termini di azioni a distanza agenti lungo le congiungenti porzioni elementari di cariche o correnti.

> È stato abituale cominciare la ricerca delle leggi di queste forze assumendo subito che i fenomeni siano dovuti a forze attrattive e repulsive agenti tra certi punti. Possiamo tuttavia ottenere una diversa descrizione dell'argomento, più adatta alle nostre indagini più difficili, supponendo, per la definizione delle forze che trattiamo, che esse possano essere rappresentate in grandezza e direzione dal moto uniforme di un fluido incompressibile. [Maxwell (173), p. 159]

Esplicita è pure la consapevolezza di Maxwell che la trattazione matematica rigorosa del modello consente di collegare tra loro fenomeni diversi al di là delle apparenze superficiali.

> Il mio scopo in questo lavoro è di aprire la strada per la speculazione in questa direzione, studiando i risultati meccanici di certi stati di tensione e di moto in un mezzo e paragonandoli con i fenomeni osservati del magnetismo e dell'elettricità. [...]
> Propongo di esaminare i fenomeni magnetici da un punto di vista meccanico e di determinare quali tensioni in, o moti di, un mezzo sono capaci di produrre i fenomeni meccanici osservati. Se, con la stessa ipotesi, possiamo connettere i fenomeni dell'attrazione magnetica con i fenomeni elettromagnetici e con quelli delle correnti indotte, avremo una teoria che, se non è vera, può essere dimostrata falsa solo con esperimenti che allargheranno di molto la nostra conoscenza di questa parte della fisica. [Maxwell (174), p. 452]

La specificazione del modello di fluido meccanico raggiunge livelli di estrema sofisticazione nella specificazione della sua struttura microscopica in termini di azioni tra vortici e sfere cariche che, attraverso complicati meccanismi di interazione, rendono conto della trasmissione delle azioni elettromagnetiche [6].

Maxwell giunge alla formulazione generale della teoria del campo elettromagnetico nella terza memoria, del 1864 [175], e nel *Trattato sull'elettricità e il magnetismo* [177], un manuale didattico del 1873. Della prima riportiamo ampi brani nell'Appendice al capitolo. In essa si pongono alla base dell'elettromagnetismo quattro equazioni fondamentali — note ormai come *equazioni di Maxwell* (cfr. la nota esplicativa in Appendice) — le quali prevedono in particolare che il campo elettromagnetico è sede di perturbazioni di tipo ondulatorio che si propagano con la medesima velocità della luce, misurata sperimentalmente. Di qui la conclusione che la luce stessa è una manifestazione particolare di tale fenomeno e quindi la possibilità di ricondurre l'ottica (una branca della fisica prima autonoma) all'elettromagnetismo. La previsione dell'esistenza delle onde elettromagnetiche sarà poi verificata sperimentalmente dal fisico tedesco H. Hertz (1857-1894), il quale nel 1888-89 riuscirà a generarle ed a rivelarle mediante opportuni circuiti elettrici.

È stato mostrato (Ziggelaar [20]) che le vicende che hanno condotto alla formulazione della teoria elettromagnetica della luce non sono in alcun modo ricostruibili razionalmente riferendosi a quello che viene comunemente inteso come « metodo scientifico » e non soddisfano nessuna pretesa « logica della scoperta ». A partire dalle « vaghe speculazioni di Faraday sulle onde magnetiche », i dati che si sono accumulati negli anni successivi sono derivati da ricerche in campi e con finalità assai diversi anziché da un succedersi di ipotesi e verifiche sperimentali ad esse pertinenti. Tutta la costruzione della teoria di Maxwell si basa in modo determinante sulla trattazione del fluido *meccanico* (poco importa che Maxwell attribuisca o meno ad esso una concreta realtà), che gli permette, tra l'altro, di introdurre in maniera diretta la cosiddetta *corrente di spostamento* (v. Appendice A) in un mezzo non conduttore: le veri-

[6] È interessante a questo proposito riportare una notazione dello storico inglese D. Cardwell: « Era un modello di gradevole aspetto vittoriano: simile infatti ad una vasta e operosa officina con pulegge, ingranaggi e collegamenti che funzionavano tutti in modo ingegnoso » (Cardwell [25], p. 258).

fiche sperimentali della teoria di Maxwell verranno, come abbiamo visto, solo 15 anni dopo il suo completamento.

Il *meccanicismo* rimane dunque, per questa fisica che si spinge al di là delle apparenze dei fenomeni, il punto di riferimento unificante, la forma di controllo sull'elaborazione scientifica, la guida sicura per la correttezza dei modelli che vengono elaborati. Vedremo come il salto qualitativo successivo nello sviluppo delle forze produttive indurrà a fine secolo un nuovo livello dell'elaborazione scientifica per il quale il punto di riferimento meccanicistico si tradurrà invece in un'indebita limitazione delle teorie e dei risultati cui si può giungere.

II.4. *La teoria cinetica dei gas*

L'ipotesi della natura cinetico-molecolare dei fenomeni termici era stata avanzata già nel '700 da D. Bernoulli e poi nell'800 da J. Herapath (1820) e da J. J. Waterston (1845), ma non aveva avuto alcun riconoscimento, tanto che questi ultimi si erano visti rifiutare la pubblicazione dei loro lavori. J. P. Joule (1818-1889) riprende l'idea nel 1848, anche se in definitiva non fa una precisa scelta tra l'ipotesi cinetica e quella di Davy (1778-1829) dell'atomo vortice, la quale — pur associando il calore al moto di particelle — lo attribuiva alla forza centrifuga anziché all'energia cinetica di traslazione nel moto caotico delle molecole in un gas.

Quando però, nel 1856, il chimico tedesco Krönig (1822-1879) pubblica un lavoro — peraltro non certo originale, nel senso che contiene molto meno di quanto era nella memoria di Waterston — il terreno è ormai maturo perché l'ipotesi venga accolta molto seriamente. Nel 1857, infatti, interviene R. Clausius (1822-1888), ancora con una certa prudenza, ma asserendo di avere già fatto da tempo molte riflessioni in quella direzione e di essere stato spinto alla pubblicazione di quei risultati dalla lettura dell'articolo di Krönig. Anche Joule ripubblica in forma ampliata il lavoro del 1848 per rivendicare la priorità dell'idea, anche se poi non proseguirà su questa via.

Clausius, nel lavoro del 1857, introduce il modello cinetico del gas perfetto in termini il più possibile aderenti all'intuizione fisica concreta:

> [...] il gas deve soddisfare le seguenti condizioni rispetto alla situazione delle molecole:

1) Lo spazio attualmente riempito dalle molecole del gas deve essere infinitesimo in rapporto all'intero spazio occupato dal gas stesso.

2) La durata di un urto, cioè il tempo richiesto per produrre il cambiamento del moto di una molecola che avviene quando essa urta un'altra molecola o una superficie fissa, deve essere infinitesimo in confronto all'intervallo di tempo tra due collisioni successive.

3) L'influenza delle forze molecolari deve essere infinitesima. [...] [Clausius (145)]

Nonostante il carattere ancora grezzo del procedimento di Clausius, l'ipotesi rivela già qui la sua fecondità, in quanto consente di *dedurre teoricamente* le leggi dei gas perfetti, già note sperimentalmente da tempo. Inoltre il lavoro di Clausius solleva ora un reale interesse ed un dibattito. Non mancano dure critiche e obiezioni, le quali mantengono anch'esse un carattere fortemente qualitativo e intuitivo, ma che danno a Clausius l'occasione per precisare quantitativamente altri concetti importanti, come quello di « cammino libero medio » delle molecole (cioè il percorso che esse compiono in media tra un urto e l'altro), che risulterà fondamentale per spiegare fenomeni quali la viscosità e la conduzione del calore nei gas.

Un netto salto di qualità si compie però quando Maxwell riprende l'argomento nel 1859. Con un'impostazione nettamente diversa da quella di Clausius, l'ipotesi cinetica viene assunta fino in fondo come un modello teorico, un'analogia, da trattare matematicamente in modo sistematico al fine di ricavarne tutte le conseguenze suscettibili di verifica sperimentale.

J. C. MAXWELL
Illustrazioni della teoria dinamica dei gas

Sono tante le proprietà della materia, specialmente in forma gassosa, che possono essere dedotte dall'ipotesi che le loro parti piccolissime siano in rapido movimento, con una velocità che aumenta con la temperatura, che la precisa natura di questo movimento diviene oggetto di curiosità razionale. Daniele Bernoulli, Herapath, Joule, Krönig, Clausius, ecc. hanno mostrato che le relazioni tra pressione, temperatura, e densità in un gas perfetto possono essere spiegate supponendo che le particelle si muovano con velocità uniforme in linea retta, urtando contro le pareti del recipiente e

producendo così la pressione. Non è necessario supporre che ogni particella viaggi a grande distanza nella stessa linea retta; giacché l'effetto nel produrre la pressione sarà lo stesso se le particelle urtano fra loro; cosicché la linea retta percorsa può essere molto breve. Il sig. Clausius ha determinato la lunghezza media del cammino in termini della distanza media delle particelle, e la distanza tra i centri di due particelle quando avviene l'urto. Non abbiamo attualmente alcun modo di appurare nessuna di queste distanze; ma certi fenomeni, come l'attrito interno dei gas, la conduzione del calore attraverso un gas, e la diffusione di un gas attraverso un altro, sembrano indicare la possibilità di determinare accuratamente la lunghezza media del cammino che una particella descrive tra due urti successivi. Al fine di porre i fondamenti di queste ricerche su princìpi meccanici precisi, dimostrerò le leggi del moto di un numero indefinito di sfere piccole, dure, perfettamente elastiche che interagiscono tra loro solo all'atto dell'urto [7].
Se si trova che le proprietà di un tale sistema di corpi corrispondono a quelle dei gas, sarà stabilita un'importante analogia fisica, che può condurre ad una conoscenza più accurata delle proprietà della materia. Se gli esperimenti sui gas sono inconsistenti con l'ipotesi di questi teoremi, allora la nostra teoria, benché coerente in se stessa, si dimostra incapace di spiegare i fenomeni dei gas. In entrambi i casi è necessario estrarre fino in fondo le conseguenze dell'ipotesi. [Maxwell (178)]

La schematizzazione matematica e l'investigazione sistematica divengono così la base di questo lavoro di Maxwell, che si dipana poi attraverso una lunghissima serie di teoremi matematici: in particolare, oltre all'equazione di stato del gas perfetto all'equilibrio termodinamico, Maxwell deduce per la prima volta la legge secondo cui si distribuiscono le velocità delle molecole in seno al gas (nota oggi come *legge di distribuzione di Maxwell-Boltzmann*) ed inoltre altri parametri termodinamici e proprietà fisiche legate a condizioni di non equilibrio, quali la viscosità, la conduzione del calore, la diffusione, viste

[7] Il fatto che l'interazione tra le molecole sia trascurabile, eccettuato all'atto degli urti, corrisponde al solo caso del gas perfetto e, in termini fisici, equivale a dire che l'energia del gas non dipende dal volume che esso occupa.

— come si dice nel brano precedente — come strumenti per precisare ulteriormente anche il modello molecolare della struttura della materia. Da questo punto di vista, una predizione risulta decisiva: l'indipendenza della viscosità del gas dalla pressione cui esso è sottoposto [8]: « Una tale conseguenza di una teoria matematica colpisce molto e il solo esperimento che ho trovato sull'argomento non sembra confermarla » (ivi, p. 391).

Successivi esperimenti confermeranno invece la validità della previsione. Il lavoro si conclude quindi col passo seguente: « Infine, stabilendo una relazione necessaria tra i moti di traslazione e di rotazione di tutte le particelle non sferiche, abbiamo dimostrato che un sistema di tali particelle potrebbe non soddisfare la relazione nota tra i due calori specifici [a volume ed a pressione costante] di tutti i gas » [9] (ivi, p. 409).

Quest'ultima conclusione si rivelerà scorretta, anche se poi — come vedremo — il problema dei calori specifici tormenterà il dibattito di fine '800. In ogni caso, Maxwell, confortato dalla conferma del risultato sulla viscosità, approfondisce l'analisi in un lavoro pubblicato nel 1866, nel quale raffina ulteriormente il livello di rigore e di schematizzazione matematica.

Su questo stesso filone di ricerca si pone, proprio in questi anni, l'austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), una delle figure più significative di questa nuova generazione di scienziati. A differenza di Maxwell egli incentra tutta la sua ricerca direttamente sul secondo principio della termodinamica. In

[8] Tale risultato, per molti versi inaspettato e contrario all'intuizione, deriva dal fatto che la viscosità (cioè l'attrito interno) risulta proporzionale tanto alla densità delle molecole (quindi alla pressione), quanto al cammino libero medio: all'aumentare della pressione aumenta la densità, ma diminuisce proporzionalmente il cammino libero medio, lasciando quindi costante il loro prodotto, e quindi la viscosità.

[9] Il calore specifico di una sostanza è la quantità di calore che è necessario somministrare (o sottrarre) ad un grammo di essa per aumentare (o diminuire) di un grado la sua temperatura. Nel caso dei gas il calore specifico dipende dalle condizioni in cui il calore viene scambiato: in particolare si definiscono il calore specifico a pressione costante e a volume costante a seconda che lo scambio di calore avvenga rispettivamente mantenendo costante la pressione o il volume del gas. Nel primo caso, fornendo calore al gas, questo si espande, compiendo così un lavoro esterno e ciò implica che una parte dell'energia fornita sotto forma di calore viene trasformata in lavoro e non contribuisce all'aumento di temperatura. Occorre dunque più calore per avere l'aumento di un grado e il calore specifico a pressione costante risulterà maggiore di quello a volume costante di una quantità che è possibile calcolare.

una prima memoria del 1866 egli ne imposta lo studio senza ancora fare ricorso all'ipotesi cinetica e cercandone una spiegazione addirittura nell'ambito della pura dinamica, come teorema di meccanica analitica: « Scopo di questo articolo è di fornire una dimostrazione completamente generale, puramente analitica, della seconda legge della termodinamica e di scoprire il teorema che le corrisponde in meccanica » (Boltzmann [131]).

È significativo che Clausius scriva un lavoro strettamente analogo cinque anni dopo, quando Boltzmann si era invece convertito completamente al punto di vista cinetico proposto nelle memorie di Maxwell. Nel 1868 Boltzmann pubblica infatti la prima di una serie di voluminose memorie che nei quattro anni successivi riescono a dare al *modello cinetico* la sua espressione più completa, fornendo anche un fondamento cinetico-molecolare al secondo principio della termodinamica. Boltzmann considera il comportamento termodinamico di un gas rarefatto (perfetto) dal punto di vista più generale possibile, in stati termodinamici, cioè, che possono discostarsi anche notevolmente da quello di equilibrio, e prova che, a causa degli urti tra le molecole, tale stato deve evolvere *irreversibilmente* fino ad arrivare allo stato di equilibrio (nel quale i parametri termodinamici si mantengono costanti). Boltzmann ritrova dunque, sulla base della trattazione cinetica, quella irreversibilità dei processi termodinamici espressa dal secondo principio della termodinamica. Egli ritiene così di poter *dedurre* tutta la termodinamica da un modello cinetico-molecolare della materia che consideri esclusivamente la meccanica degli urti delle particelle di cui essa è composta. Si tratta chiaramente di una impostazione fondata sull'uso dell'ipotesi cinetica in un contesto prettamente meccanicistico, che nel seguito solleverà contraddizioni di fondo ed evolverà verso considerazioni di carattere probabilistico, polarizzando gran parte di un acceso scontro di posizioni alla fine del secolo (cfr. cap. VII).

Per il momento ci interessa rilevare la piena consapevolezza che anche Boltzmann dimostra del nuovo livello raggiunto dall'elaborazione scientifica, della fecondità delle ipotesi e dei modelli — pur sempre vincolati ai presupposti meccanicistici già rilevati per la fondazione dell'elettromagnetismo — per mettere in luce connessioni insospettate tra i fenomeni: strumenti molto potenti, quindi, per approfondire il controllo dell'uomo sulla natura.

II.5. *Conclusioni*

Un'analisi simile a quella finora condotta potrebbe essere fatta per le altre branche scientifiche, anche se esse registrano probabilmente dei ritardi nell'assestarsi su un nuovo livello, per il fatto che le discipline fisiche sono più direttamente legate alle innovazioni della rivoluzione industriale. Possiamo limitarci a poche considerazioni, a puro titolo esemplificativo. Il forte impulso ricevuto dalla ricerca scientifica nei primi decenni dell'800 aveva portato ad una chiara definizione dei campi d'indagine delle diverse discipline, nonché ad un progresso notevole delle tecniche specifiche. Lo sviluppo di forme perfezionate di microscopi acromatici aveva condotto all'individuazione negli esseri viventi delle cellule, così come il perfezionamento delle tecniche di prospezione geologica aveva ormai messo in luce le stratificazioni della superficie terrestre e la varietà delle specie fossili. Il periodo positivistico aveva registrato una minuziosa opera di raccolta, organizzazione e classificazione di dati e osservazioni, nella cui interpretazione si scontravano però punti di vista improntati a speculazioni ancora generiche e metafisiche: se le cellule fossero entità vitali autonome (come sostenevano i tedeschi M. Schleiden e R. Virchow e il belga T. Schwann: il romanticismo tedesco attribuiva d'altronde particolare importanza all'autonomia individuale), o se invece si compenetrassero in una totalità strutturale dell'organismo; se la moltiplicazione cellulare fosse dovuta a forze metaboliche vitali che trasformavano la materia intercellulare (come sostenevano i già citati Schleiden e Schwann), o piuttosto ad una trasformazione del nucleo cellulare all'interno della cellula madre (von Mohl, Nageli, Hofmeister, Kolliker, Leydig, Remak); e similmente, se gli strati geologici fossero stati prodotti dall'opera graduale di forze naturali costanti (Hutton), oppure da cataclismi improvvisi, diluvi universali che avevano sconvolto la faccia della terra (Cuvier); e così via. Speculazioni, dunque, incapaci di divenire indirizzi fertili di indagine, basi per veri salti di qualità.

La svolta si verifica anche qui grosso modo nella seconda metà del secolo e può essere messa in luce limitandosi a pochi esempi. La prima formulazione coerente dell'evoluzionismo biologico risaliva a Lamarck (1809, *Philosophie zoologique*) e si fondava sull'idea che fosse la funzione a creare l'organo, idea che riflette la serena fiducia — tipica di una borghesia in rapida espansione — nella capacità dell'autonoma iniziativa

dell'uomo a trasformare il mondo a proprio vantaggio, sottoponendolo ad un controllo sempre più efficace. L'*Origine delle specie*, pubblicata nel 1859 da Charles Darwin (1809-1882), esprime piuttosto, con i meccanismi della lotta per l'esistenza, la piena maturità dei meccanismi concorrenziali capitalistici. A conferma di ciò va ricordato non solo che Darwin è fortemente influenzato dalla teoria di Malthus (secondo cui la crescita della popolazione porterebbe ad una fatale scarsità di cibo), ma anche che il filosofo Spencer estende la teoria della selezione naturale alla società umana, considerando la sua evoluzione come dovuta alla « sopravvivenza dei più adatti »: una struttura di pensiero, dunque, che si colloca pienamente all'interno della struttura liberistica degli inizi dell'età vittoriana e ne razionalizza i meccanismi.

Ma, al di là di questo, è possibile riscontrare proprio nella teoria di Darwin il nuovo livello dell'indagine scientifica, da noi individuato in questo capitolo, l'uso di ipotesi condotte coerentemente ad esprimere la loro completa potenzialità nell'evidenziare le connessioni dei fenomeni. Non a caso, infatti, gli attacchi rivolti alla teoria di Darwin si fondano principalmente sul fatto che essa non è *induttiva*, che si basa cioè su *assunti* che vanno ben al di là dei puri fatti; ed è significativo che la risposta di Darwin rivendichi per l'appunto, con piena consapevolezza, l'utilità e la fecondità delle ipotesi:

> Ciò cui Ella accenna in via generale è molto, molto vero: e cioè che il mio lavoro sia gravemente ipotetico e che per molte parti non meriti neppure di essere chiamato induttivo; il mio errore più comune è forse quello di basare le mie induzioni su troppo pochi fatti. [Darwin (147), p. 126]

> Ho sempre considerato la dottrina della selezione naturale un'ipotesi che, qualora spiegasse grandi ordini di fatti, meriterebbe di venire considerata una teoria degna di accettazione; questo ovviamente è il mio parere personale. [Ivi, pp. 139-40].

Di fatto, sulla base di questo nuovo livello di indagine dell'uso consapevole di un metodo fondato su ipotesi controllabili, che allargano in modo decisivo le conoscenze dei fenomeni naturali, la biologia e la geologia trovano la strada per affrancarsi dai residui di speculazione metafisica. C. Lyell (1797-1875), riprendendo le idee di Hutton, collega in un quadro

scientificamente coerente le conoscenze geologiche, aderendo pienamente alla teoria darwiniana, che elimina le difficoltà di interpretazione della successione di fossili negli strati rocciosi.

Insistiamo ancora, però, sul fondamento *meccanicistico* di tutti i tipi di spiegazioni e di ipotesi adottate dalla scienza di questo periodo. Nella fisica, in particolare, la *meccanica* mantiene il ruolo fondamentale di quadro di riferimento e di strumento di controllo sugli sviluppi di branche che tenderebbero altrimenti a divenire sempre più autonome e specializzate per poter fornire il supporto scientifico alla parcellizzazione cui si avviano le branche produttive. È molto importante mettere in luce come tale quadro di riferimento sia legato ad una fase della teorizzazione scientifica che corrisponde ad un livello di sviluppo delle forze produttive nel quale la macchina è composta di una serie di parti la cui interazione può essere puntualmente ricostruita e dalle quali si può risalire direttamente al funzionamento della macchina nel suo complesso. La ricerca di un modello dei fenomeni fisici, allo stesso modo, non può essere che la « costruzione » di un *meccanismo* capace di restituire le leggi osservabili dei fenomeni nel loro complesso e nelle loro connessioni. È in questo senso che il meccanicismo rimarrà per tutta una lunga fase il *fondamento unificante* della scienza ottocentesca, pur nel crescente dinamismo delle sue articolazioni e specializzazioni.

Eppure, si può affermare che, con le grandi sintesi teoriche che abbiamo discusso, si conclude la fase in cui il progresso tecnico indotto dalla *prima rivoluzione industriale* in Inghilterra e in Francia e il dinamismo dei nuovi ceti sociali borghesi avevano aperto nuove strade all'indagine scientifica. Verso la fine degli anni '60 si è in gran parte compiuta una sintesi razionale dei contenuti conoscitivi che vengono emergendo dalla nuova organizzazione produttiva e sociale, rendendo così possibile il controllo razionale e la previsione di un insieme sempre più ampio di fenomeni.

Vedremo in seguito che — nel contesto di un nuovo, impetuoso sviluppo delle forze produttive e della modificazione dei rapporti sociali che le inquadrano — tale assetto entrerà profondamente in crisi e si scontrerà da un lato con il riemergere di posizioni di carattere fenomenologico e dall'altro con l'urgenza di definire nuovi criteri metodologici per l'operare scientifico, più adeguati ai compiti diversi — di integrazione più dinamica, efficiente ed innovatrice — che spetteranno sempre più alla scienza. Proprio in questo nuovo contesto il *meccanicismo*,

del quale abbiamo delineato le caratteristiche, si rivelerà una istanza paralizzante e limitativa delle potenzialità di sviluppo dell'indagine scientifica. Esso non si fossilizzerà infatti in questa forma e, prima di venire definitivamente superato, evolverà come vedremo in forme nuove. Se è vero comunque che la crisi esploderà in forme vivaci nell'ambito della fisica, non è difficile riconoscere che la strada attraverso cui le radici strutturali di tale crisi maturano e si riflettono al suo interno passa per un'altra disciplina che proprio in quegli anni raggiunge la piena maturità, preparandosi a stabilire un legame più organico e dinamico col fronte più avanzato della produzione industriale. Tale disciplina è la chimica, il cui sviluppo in questo periodo merita un'analisi particolare proprio per il ruolo di fondo che essa assumerà poi nel corso della *seconda rivoluzione industriale*.

Appendice A

La teoria del campo elettromagnetico

La teoria dei fenomeni elettromagnetici si fonda su quattro equazioni fondamentali, note come *equazioni di Maxwell*. La loro forma matematica è complessa e rimandiamo il lettore a testi specifici, limitandoci invece qui a richiamare solo alcuni aspetti, necessari al lettore più sprovveduto in questo campo, per inquadrare correttamente il salto qualitativo rappresentato dall'impostazione di Maxwell, quale si esprime in maniera esemplare nei lavori da cui sono tratti i brani che seguono.

Le *prime due equazioni* del campo elettromagnetico riassumono essenzialmente il fatto che da un lato le forze con cui interagiscono le cariche elettriche ubbidiscono alla legge di Coulomb, mentre invece nel caso del magnetismo non esistono « cariche magnetiche » isolate, ma solo polarità magnetiche opposte le quali si presentano sempre accoppiate.

La *terza legge* del campo elettromagnetico esprime in sostanza il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, scoperto da Faraday nel 1831, secondo cui in un circuito conduttore chiuso si genera una corrente elettrica se questo è attraversato da un campo magnetico variabile: la forza elettromotrice generata nel circuito è pari alla variazione del flusso del campo magnetico che l'attraversa e che può essere dovuta o ad una variazione dell'intensità del campo, oppure ad un movimento del circuito nel campo, eventualmente costante. È questo il principio che è alla base del funzionamento della dinamo e dei motori elettrici.

Verso la metà del secolo queste tre leggi erano in sostanza state stabilite a livello fenomenologico, come leggi concernenti fenomeni

dei quali mancava ancora una concezione unitaria. Ciò consente di rendersi conto concretamente dell'enorme salto qualitativo che il metodo di indagine di Maxwell consente di compiere.

Il primo dei seguenti brani di Maxwell è forse l'esposizione più chiara e completa della sua concezione del *campo* come entità materiale che riempie tutto lo spazio, permea i corpi, comportandosi come un fluido meccanico, capace di trasmettere tutte le perturbazioni che in esso vengono provocate. L'*unificazione* dei fenomeni elettromagnetici avviene proprio sulla base delle concrete proprietà del fluido, dalle quali vengono appunto tratte matematicamente le quattro equazioni che ne reggono tutti i comportamenti.

Si noti, per esempio, come una delle predizioni fondamentali della teoria non venga tratta dalle proprietà dei fenomeni elettromagnetici in sé, ma venga innanzitutto inferita dalle proprietà del fluido: l'esistenza di onde elettromagnetiche che si propagano nello spazio viene infatti introdotta al punto 6 del brano che segue sulla base di considerazioni meccaniche molto concrete. È proprio il modello meccanico, insomma, a consentire a Maxwell la predizione: in un fluido meccanico con certe proprietà *devono* infatti propagarsi disturbi ondulatori con velocità finita. Solo nel seguito viene fornita la legge matematica e la spiegazione fisica in termini elettromagnetici. Ne è alla base infatti una delle acquisizioni fondamentali di Maxwell. In un dielettrico sono ovviamente presenti cariche elettriche le quali, anche se non possono circolare liberamente e dar luogo a un'ordinaria corrente elettrica, possono tuttavia spostarsi sotto l'azione di una forza e polarizzare così le molecole del dielettrico. Ne segue — come Maxwell sottolinea ai punti 11 e 12 del brano — che se si genera improvvisamente un campo elettrico, le cariche del dielettrico subiscono degli spostamenti che danno luogo transitoriamente (cioè finché dura la variazione del campo) ad una *corrente di spostamento*. Ma il vuoto, anche in assenza di materia ordinaria, è per Maxwell permeato dal fluido materiale che, rispetto ai fenomeni elettromagnetici, si comporta come gli ordinari dielettrici: ne segue che *anche in assenza di materia*, una variazione di campo elettrico genera un effetto, chiamato ancora impropriamente « *corrente* » *di spostamento*, che non comporta spostamento di cariche, ma genera ugualmente (come un'ordinaria corrente) un campo magnetico le cui linee di forza sono disposte perpendicolarmente a quelle del campo elettrico. Nel circuito mostrato in fig. 1, dove G è un generatore di corrente continua, la chiusura dell'interruttore I provoca una brusca variazione del campo elettrico $\vec{E}$ tra le armature del condensatore C e quindi si genera un campo magnetico $\vec{H}$ le cui linee di forza chiuse si avvolgono intorno a quelle del campo elettrico (fig. a), nello stesso modo in cui ciò avviene per una corrente elettrica effettiva (fig. b). La presenza della corrente di spostamento, confermata poi indipendentemente dalla validità del modello mecca-

nico adottato da Maxwell è alla base della *quarta equazione* del campo ed ha una conseguenza fisica della massima importanza: esso comporta infatti che si possono generare delle *onde elettro-*

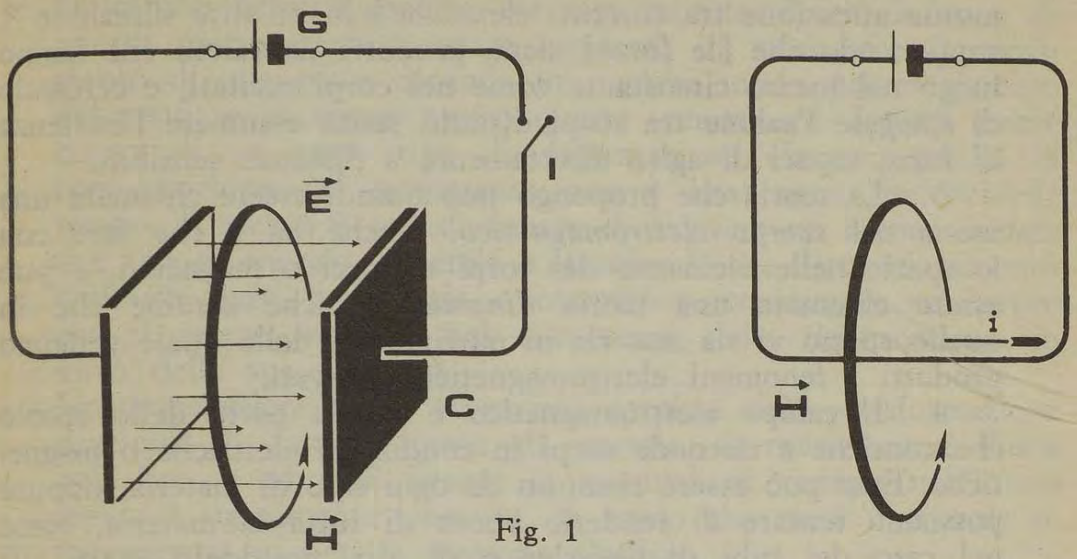


Fig. 1

magnetiche, cioè una propagazione ondosa di un campo elettrico $\vec{E}$ e di un campo magnetico $\vec{H}$, sempre perpendicolari fra loro ed alla direzione di propagazione $\vec{n}$ (v. fig. 2), con velocità pari a quella della luce. Questo induce Maxwell — al punto 97 del primo scritto, e poi nel secondo scritto che segue — ad identificare, sulla base

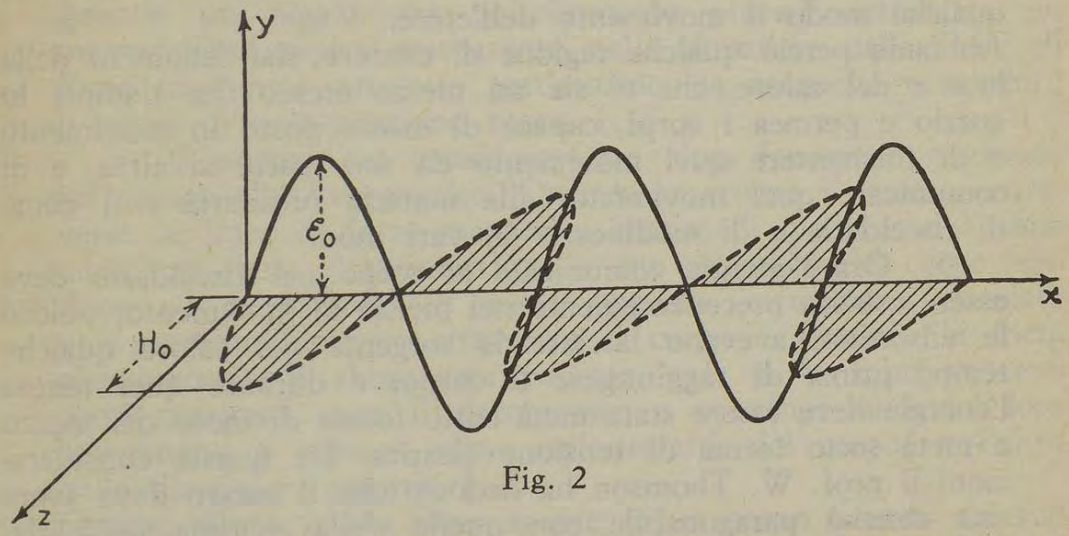


Fig. 2

materiale del suo modello nel quale sarebbe inutile riempire lo spazio con due fluidi aventi le medesime proprietà meccaniche, le onde luminose e le onde elettromagnetiche. La teoria elettromagnetica lega allora la velocità delle onde alla costante dielettrica ϵ del mezzo ed alla permeabilità magnetica μ attraverso la relazione $c = 1/\sqrt{\epsilon \mu}$.

2. [...] Ho preferito [...] cercare una spiegazione [della mutua attrazione tra correnti elettriche] in un'altra direzione[10], supponendo che [le forze] siano prodotte da azioni che hanno luogo nel mezzo circostante come nei corpi eccitati, e cercando di spiegare l'azione tra corpi distanti senza assumere l'esistenza di forze capaci di agire direttamente a distanze sensibili.

3. La teoria che propongo può quindi essere chiamata una teoria del *campo elettromagnetico*, perché ha a che fare con lo spazio nelle vicinanze dei corpi elettrici o magnetici, e può essere chiamata una teoria *dinamica*, poiché assume che in quello spazio vi sia materia in movimento, dalla quale vengono prodotti i fenomeni elettromagnetici osservati.

4. Il campo elettromagnetico è quella parte dello spazio che contiene e circonda corpi in condizioni elettriche o magnetiche. Esso può essere riempito da ogni tipo di materia, oppure possiamo tentare di renderlo vuoto di tutta la materia, come nel caso dei tubi di Geissler o di altri cosiddetti vuoti. Vi rimane sempre, tuttavia, abbastanza materia per ricevere e trasmettere le vibrazioni della luce e del calore, ed è per il fatto che la trasmissione di queste radiazioni non viene molto alterata quando corpi trasparenti di densità misurabile vengono sostituiti al cosiddetto vuoto, che siamo obbligati ad ammettere che le vibrazioni sono quelle di una sostanza eterea, e non dell'ordinaria materia, la cui presenza si limita a modificare in qualche modo il movimento dell'etere.
Abbiamo perciò qualche ragione di credere, dai fenomeni della luce e del calore, che vi sia un mezzo etereo che riempie lo spazio e permea i corpi, capace di essere posto in movimento e di trasmettere quel movimento da una parte all'altra, e di comunicare quel movimento alla materia ordinaria così come di riscaldarla e di modificarla in vari modi.

5. Ora l'energia comunicata al corpo nel riscaldarlo deve essere esistita precedentemente nel mezzo in movimento, poiché le vibrazioni avevano lasciato la sorgente del calore qualche tempo prima di raggiungere il corpo, e durante quel tempo l'energia deve essere stata metà sotto forma di moto del mezzo e metà sotto forma di tensione elastica. Da queste considerazioni il prof. W. Thomson ha dedotto che il mezzo deve avere una densità paragonabile con quella della materia ordinaria, ed ha pure assegnato un limite inferiore per quella densità.

6. Dobbiamo quindi ammettere, come un dato derivato da una branca della scienza indipendente da quella che stiamo

[10] In contrapposizione, cioè, alle teorie dell'azione a distanza, cui Maxwell si è riferito all'inizio della memoria.

considerando, l'esistenza di un mezzo che riempie tutto lo spazio, di densità piccola ma reale, capace di essere posto in movimento, e di trasmettere il movimento da una parte all'altra con velocità grande, ma non infinita. Perciò le parti di questo mezzo devono essere connesse in modo che il movimento di una parte dipenda in qualche modo dal movimento del resto; e al tempo stesso queste connessioni devono essere capaci di un certo tipo di deformazione elastica, poiché la comunicazione del movimento non è istantanea, ma richiede tempo. Il mezzo è quindi capace di ricevere ed immagazzinare due tipi di energia, l'energia « attuale »[11] che dipende dai moti delle sue parti, e l'energia « potenziale », consistente nel lavoro che il mezzo eseguirà nel riassestarsi dalla deformazione in virtù della sua elasticità.
La propagazione delle vibrazioni consiste nella trasformazione continua di queste forme di energia alternativamente l'una nell'altra, e ad ogni istante la quantità di energia nell'intero mezzo è ugualmente ripartita, in modo che metà è energia di movimento, e metà è tensione elastica.

7. Un mezzo che abbia una tale costituzione può essere capace di tipi di movimento e di deformazione diversi da quelli che producono i fenomeni della luce e del calore, e alcuni di essi possono essere di tipo tale da essere messi in evidenza ai nostri sensi dai fenomeni che producono.

8. Ora sappiamo che il mezzo luminoso è in certi casi influenzato dal magnetismo; Faraday ha infatti scoperto che quando un raggio con polarizzazione piana[12] attraversa un mezzo diamagnetico trasparente nella direzione delle linee di forza magnetica prodotte tutt'attorno da magneti o correnti, il piano di polarizzazione ruota. [...]

9. Possiamo ora considerare un altro fenomeno osservato nel campo elettromagnetico. Quando un corpo si muove attraverso le linee di forza magnetica risente di quella che è chiamata una forza elettromotrice; le due estremità del corpo tendono ad elettrizzarsi di segno opposto, e tende a circolare una corrente elettrica attraverso il corpo[13]. Quando la forza elettromotrice è abbastanza potente, e la si fa agire su certi corpi composti, essa li decompone, e costringe uno dei loro componenti a passare verso un'estremità del corpo, e l'altro nella direzione opposta. [...]
Questa, allora, è una forza agente su un corpo causata dal suo moto attraverso il campo elettromagnetico, o da cambiamenti

[11] Questa è la moderna *energia cinetica*.
[12] Quella che noi oggi chiamiamo polarizzazione lineare: onde trasversali, cioè, che oscillano tutte su un medesimo piano.
[13] Questo è il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, descritto dalla terza legge del campo.

che hanno luogo in quel campo; e l'effetto della forza è o la produzione di una corrente ed il riscaldamento del corpo, o la decomposizione del corpo, oppure, quando entrambe le cose sono impossibili, la creazione nel corpo di uno stato di polarizzazione elettrica, — uno stato di tensione in cui estremità opposte vengono elettrizzate di segno opposto, e da cui il corpo tende a rilassarsi non appena la forza disturbatrice è rimossa.

10. Secondo la teoria che mi propongo di esporre, questa « forza elettromotrice » è la forza che interviene quando il moto si trasmette da una parte del mezzo a un'altra, ed è per mezzo di questa forza che il movimento in una parte provoca il movimento in un'altra parte. Quando la forza elettromotrice agisce su un circuito conduttore, essa produce una corrente, la quale, quando incontra una resistenza, dà luogo ad una trasformazione continua di energia elettrica in calore, che non è possibile trasformare nuovamente in energia elettrica rovesciando in qualsiasi modo il processo [14].

11. Ma quando la forza elettromotrice agisce su un dielettrico essa produce uno stato di polarizzazione delle sue parti con distribuzione simile alla polarità delle parti di una massa di ferro sotto l'influenza di un magnete, e come la polarizzazione magnetica, descrivibile come uno stato in cui ogni particella ha i poli opposti in condizioni opposte. In un dielettrico sotto l'azione di una forza elettromotrice, possiamo pensare che l'elettricità in ogni molecola sia spostata in modo che un lato sia elettrizzato positivamente e l'altro negativamente, ma che l'elettricità rimanga interamente unita alla molecola, e non passi da una molecola all'altra. L'effetto di questa azione sull'intera massa dielettrica è di produrre uno spostamento generale di elettricità in una certa direzione. Questo spostamento non dà luogo ad una corrente, perché quando ha raggiunto un certo valore rimane costante, ma è l'inizio di una corrente, e le sue variazioni costituiscono correnti nella direzione positiva o negativa a seconda che lo spostamento sia crescente o decrescente. All'interno del dielettrico non vi è alcun segno di elettrizzazione, perché l'elettrizzazione della superficie di ogni molecola è neutralizzata dall'elettrizzazione opposta della superficie delle molecole in contatto con essa; ma alla superficie limite del dielettrico, dove l'elettrizzazione non è neutralizzata, riscontriamo i fenomeni che indicano elettrizzazione positiva o negativa.

[14] In questo passo sono espressi due fenomeni fisici: la legge di Joule, che regola la produzione di calore dovuta al passaggio di corrente attraverso una resistenza; e la seconda legge della termodinamica, secondo cui la trasformazione di energia elettrica in calore è un processo fisico irreversibile, nel senso che non può procedere spontaneamente in senso opposto.

La relazione tra la forza elettromotrice e l'entità dello spostamento elettrico che essa produce dipende dalla natura del dielettrico, e la medesima forza elettromotrice produce in generale uno spostamento elettrico maggiore nei dielettrici solidi, come il vetro o lo zolfo, che nell'aria.

12. Qui, dunque, cogliamo un altro effetto della forza elettromotrice, cioè lo spostamento elettrico, il quale secondo la nostra teoria è una specie di risposta elastica all'azione della forza, simile a quella che ha luogo nelle strutture e nelle macchine a causa della mancanza di rigidità delle connessioni. [...]

15. Risulta quindi che certi fenomeni nell'elettricità e nel magnetismo conducono alla stessa conclusione di quelli dell'ottica, cioè, che vi è un mezzo etereo che pervade tutti i corpi, e che è modificato solo in parte dalla loro presenza; che le parti di questo mezzo sono suscettibili di essere poste in movimento da correnti elettriche e magneti; che questo movimento viene comunicato da una parte del mezzo all'altra da forze che hanno origine dalle connessioni di quelle parti; che sotto l'azione di queste forze vi è una certa risposta che dipende dall'elasticità di queste connessioni; e che quindi può esistere nel mezzo energia in due forme diverse, l'una essendo l'energia attuale di moto delle sue parti, e l'altra essendo l'energia potenziale immagazzinata nelle connessioni, in virtù della loro elasticità.

16. In conseguenza, allora, siamo condotti alla concezione di un meccanismo complicato capace di una grande varietà di movimenti, ma allo stesso tempo connesso in modo tale che il movimento di una parte dipende, secondo relazioni definite, dal movimento di altre parti, questi movimenti essendo comunicati da forze generate dallo spostamento relativo delle parti connesse, in virtù della loro elasticità. Tale meccanismo deve essere soggetto alle leggi generali della Dinamica, e dovremmo essere capaci di sviluppare tutte le conseguenze del suo movimento, purché conosciamo la forma della relazione tra i movimenti delle parti [15]. [...]

20. Le equazioni generali vengono poi applicate al caso di un disturbo magnetico che si propaga in seno ad un campo non conduttore, e si mostra che i soli disturbi che si possono propagare in questo modo sono quelli trasversali rispetto alla direzione di propagazione, e che la velocità di propagazione è la velocità v, trovata in esperimenti come quelli di Weber, che esprime il numero di unità elettrostatiche di elettricità che sono contenute in un'unità elettromagnetica.

[15] Si coglie qui pienamente il senso dell'operazione di *unificazione* di tutti i fenomeni elettromagnetici sulla base della trattazione matematica del fluido meccanico, punto di riferimento fondamentale della trattazione di Maxwell, malgrado le sue precisazioni al punto 73 sulla sua natura puramente matematica e non materiale.

Questa velocità è così prossima a quella della luce, che ci pare di avere forti ragioni per concludere che la luce stessa (compreso il calore raggiante, ed altre radiazioni eventuali) è un disturbo elettromagnetico sotto forma di onde che si propagano attraverso il campo elettromagnetico secondo le leggi dell'elettromagnetismo. Se è così, l'accordo tra l'elasticità del mezzo calcolata dal rapido alternarsi delle vibrazioni luminose, e trovata dai processi lenti degli esperimenti elettrici, mostra quanto debbano essere perfette e regolari le proprietà elastiche del mezzo quando esso è sgombro di materia più densa dell'aria. [...]

73. In una precedente occasione ho cercato di descrivere un tipo particolare di movimento ed un tipo particolare di tensione, tale da rendere conto dei fenomeni. Nel presente lavoro evito qualsiasi ipotesi di questo tipo; e nell'usare parole quali 'momento elettrico' ed 'elasticità elettrica' riferendomi ai fenomeni noti dell'induzione di correnti e della polarizzazione dei dielettrici, intendo semplicemente guidare la mente del lettore verso fenomeni meccanici che lo aiuteranno a comprendere quelli elettrici. Tutte le frasi siffatte nel presente lavoro devono essere considerate come illustrative, e non come esplicative.

74. Nel parlare dell'energia del campo, tuttavia, desidero essere inteso alla lettera. Tutta l'energia è identica ad energia meccanica, sia che essa esista nella forma di moto o in quella di elasticità, o in qualsiasi altra forma. L'energia nei fenomeni elettromagnetici è energia meccanica. Il solo problema è: dove risiede? Secondo le vecchie teorie essa risiede nei corpi elettrizzati, nei circuiti conduttori, e nei magneti, sotto forma di una qualità ignota chiamata energia potenziale, o capacità di produrre certi effetti a distanza. Secondo la nostra teoria essa risiede nel campo elettromagnetico, nello spazio che circonda i corpi elettrizzati e magnetizzati, così come in quegli stessi corpi, ed assume due forme diverse, che possono essere descritte senza ipotesi come polarizzazione magnetica e polarizzazione elettrica, o, secondo un'ipotesi molto probabile, come il movimento e la tensione di uno e di un solo mezzo.

75. Le conclusioni cui si giunge nel presente lavoro sono indipendenti da quest'ipotesi, poiché sono dedotte da fatti sperimentali di tre tipi:

1. L'induzione di correnti elettriche dovute all'aumento o alla diminuzione di correnti vicine in conformità ai cambiamenti delle linee di forza che passano attraverso il circuito;
2. La distribuzione dell'intensità magnetica secondo le variazioni di un potenziale magnetico;
3. L'induzione (o influenza) dell'elettricità statica attraverso i dielettrici.

Possiamo ora procedere a dimostrare da questi princìpi l'esi-

stenza e le leggi delle forze meccaniche che agiscono su correnti elettriche, magneti e corpi elettrizzati posti nel campo elettromagnetico. [Maxwell (175)]

J. C. MAXWELL
La teoria elettromagnetica della luce

[...] Se i mezzi luminifero ed elettromagnetico occupano il medesimo spazio, e trasmettono disturbi con la stessa velocità quali ragioni abbiamo di mantenerli distinti fra loro? Considerandoli come lo stesso fluido, evitiamo almeno l'inconveniente di riempire due volte lo spazio con tipi diversi di etere. Per di più, il solo tipo di disturbi elettromagnetici che possono propagarsi attraverso un mezzo non conduttore è un disturbo trasversale alla direzione di propagazione, in accordo per questo con quanto conosciamo di quel disturbo che chiamiamo luce. Perciò, per tutto quello che sappiamo, anche la luce può essere un disturbo elettromagnetico in un mezzo non conduttore. Se ammettiamo questo, la teoria elettromagnetica della luce sarà in completo accordo con la teoria ondulatoria, e l'opera di Thomas Young e di Fresnel si fonderà su basi più che mai solide, una volta congiunta con quella di Cavendish e di Coulomb attraverso la chiave di volta delle scienze unite della luce e dell'elettricità — la grande scoperta di Faraday della rotazione elettromagnetica della luce. Gli immensi spazi interplanetari e interstellari non saranno più considerati come posti deserti dell'universo, che il Creatore non ha considerato adatti da riempire con i simboli del molteplice ordine del Suo regno. Li troveremo già pieni di questo mezzo meraviglioso; così pieni che nessun potere umano è in grado di rimuoverlo dalla più piccola porzione di spazio, o di produrre il più piccolo flusso nella sua infinita continuità. Esso si estende senza interruzione da una stella all'altra; e quando una molecola di idrogeno vibra nella costellazione del Cane, il mezzo riceve gli impulsi di queste vibrazioni; e dopo averli trasportati nel suo immenso seno per tre anni, li consegna a tempo debito, in perfetto ordine, e senza nulla tralasciare, nello spettroscopio del sig. Huggins a Tulse Hill.
Ma il mezzo ha altre funzioni ed operazioni oltre a portare la luce da un uomo all'altro, e da un mondo all'altro, ed a portare evidenza dell'unità assoluta del sistema metrico dell'universo. Le sue parti piccolissime possono possedere movimenti rotatori oltre che vibratori, e gli assi di rotazione formano quelle linee di forza magnetica che si estendono senza interruzione alcuna in regioni che nessun occhio ha visto, e che, tramite la loro azione sui nostri magneti, ci dicono in linguaggio non ancora interpretato, che cosa sta accadendo nell'oltretomba invisibile di minuto in minuto e di secolo in

secolo. E queste linee non devono essere considerate come astrazioni matematiche. Esse sono le direzioni in cui il mezzo esercita una tensione simile a quella di una fune, o piuttosto, simile a quella dei nostri muscoli. La tensione del mezzo nella direzione della forza magnetica della Terra è in questo paese pari al peso di un grano su otto piedi quadrati. In alcuni esperimenti del dott. Joule, il mezzo ha esercitato una tensione di 200 libbre di peso per pollice quadrato.

Ma il mezzo, grazie alla stessa elasticità con la quale è in grado di trasmettere le vibrazioni della luce, è anche capace di comportarsi come una molla. Quando è opportunamente teso, esercita una tensione, diversa dalla tensione magnetica, tramite la quale attira assieme corpi elettrizzati di segno opposto, produce effetti sul percorso dei fili telegrafici, e quando ha intensità sufficiente, porta alla scarica ed all'esplosione chiamata fulmine.

Queste sono alcune delle proprietà già scoperte di quello che è spesso stato chiamato vuoto, o nulla. Esse ci mettono in grado di scomporre molti tipi di azioni a distanza in azioni tra parti contigue di una sostanza continua. Se questa scomposizione sia una spiegazione o una complicazione, lo lascio decidere ai metafisici. [Maxwell (176)]

Appendice B

Il contributo di Boltzmann alla teoria cinetica dei gas

Fino al 1872 Boltzmann porta al massimo sviluppo l'approccio cinetico inaugurato ufficialmente dai lavori di Krönig e Clausius discussi al § II.4: questi — e più coerentemente Maxwell — avevano dedotto i parametri termodinamici di un gas (temperatura, pressione, calori specifici, ecc.) come valori medi di proprietà molecolari.

Tre sono sostanzialmente i passi avanti che Boltzmann compie fino al 1872. In primo luogo, nella memoria da cui è tratto il brano che segue, egli esplicita il concetto che il calcolo dei valori medi ubbidisce alle leggi della teoria della probabilità. È però necessario sottolineare il carattere ancora parziale di tale acquisizione. Boltzmann si limita infatti ad asserire che il calcolo dei valori medi è un metodo che attiene ad una teoria *esatta* quale la teoria della probabilità, e pertanto la teoria cinetica ha basi rigorose. Egli rimane però convinto che, al di là del metodo di calcolo, tali valori medi risultino determinati dalle leggi dinamiche che regolano il moto delle molecole: il fondamento della teoria rimane insomma meccanicistico. Tuttavia — e questa è una seconda acquisizione che non era mai stata formulata con altrettanta chiarezza dagli autori precedenti — il calcolo dei valori medi non richiede che si risolvano le equazioni del moto per tutte le molecole del gas, come invece imporrebbe

il metodo della meccanica. Questo concetto verrà ulteriormente elaborato nei lavori successivi: in essi si chiarirà la differenza tra *stato dinamico* del sistema (individuato dalle traiettorie di tutte le molecole) e *stato termodinamico* (individuato da pochi parametri *macroscopici*, che sono appunto valori medi delle proprietà molecolari): il calcolo del secondo non esige affatto la risoluzione completa del problema dinamico (cioè l'integrazione delle equazioni del moto delle molecole), giacché il calcolo dei valori medi si può fare per altra via, completamente diversa, sulla base della teoria cinetica. D'altro lato, però, la convinzione che questa seconda via coinvolga soltanto le leggi della meccanica solleverà notevoli difficoltà e porterà Boltzmann — come vedremo al cap. VII — a dover riconoscere che l'aspetto probabilistico, o statistico, della teoria è ben più profondo e sostanziale in quanto è necessario, al pari delle leggi della dinamica, per precisare lo stato macroscopico del sistema.

La terza acquisizione di Boltzmann consiste nel riconoscimento che le proprietà termodinamiche non si limitano ai valori di pochi parametri, ma coinvolgono anche le leggi che regolano la loro variazione nel tempo, cioè la *seconda legge della termodinamica*, che stabilisce un'*irreversibilità*, una direzione privilegiata nella quale avvengono i fenomeni termodinamici spontanei. Egli per primo fornisce qui una dimostrazione di tale comportamento (teorema H), mostrando che si può definire una grandezza media sulle proprietà delle molecole del gas (detta appunto « funzione H »), la quale diminuisce sempre nel corso dell'evoluzione dello stato del gas, fino a diventare costante quando esso raggiunge lo stato di equilibrio, corrispondente alla legge di Maxwell della distribuzione delle velocità delle molecole: l'*entropia* risulterà poi proporzionale alla funzione H cambiata di segno e quindi aumenta sempre durante l'evoluzione dello stato del gas. Malgrado la convinzione che tale dimostrazione si basi esclusivamente sulla trattazione *meccanica* delle collisioni tra le molecole, essa verrà poi reinterpretata probabilisticamente nel senso suddetto negli anni successivi.

L. BOLTZMANN
Irreversibilità e secondo principio della termodinamica

La teoria meccanica del calore assume che le molecole di un gas non siano a riposo, ma piuttosto in movimento vivacissimo. Quindi, anche se lo stato del corpo non cambia, le singole molecole cambiano incessantemente il loro stato di moto, e le diverse molecole assumono innumerevoli posizioni diverse l'una rispetto all'altra. Il fatto che ciononostante noi osserviamo leggi perfettamente definite di comportamento dei corpi caldi deve essere attribuito alla circostanza che gli eventi più casuali, quando essi avvengono nelle medesime proporzioni, danno lo stesso valore medio. Infatti le molecole del corpo sono real-

mente così numerose ed il loro movimento è talmente rapido, che noi non possiamo percepire altro che valori medi. Si potrebbe paragonare la regolarità di questi valori medi con la straordinaria costanza dei numeri medi fornita dalla statistica, che derivano anch'essi da processi ognuno dei quali è determinato da un'interazione completamente imprevedibile con molti altri fattori. Le molecole sono similmente altrettanti individui aventi gli stati di moto più vari, e le proprietà del gas rimangono immutate solo perché il numero di esse che hanno, in media, un particolare stato di moto è costante. La determinazione di valori medi è lo scopo della teoria della probabilità. Quindi, i problemi della teoria meccanica del calore sono anche problemi di teoria della probabilità. Sarebbe, tuttavia, errato credere che la teoria meccanica del calore sia per questo soggetta a qualche incertezza per il fatto che vi sono usati i princìpi della teoria della probabilità. Non si deve confondere una legge nota in modo incompleto, la cui validità è pertanto dubbia, con una legge completamente nota del calcolo delle probabilità; quest'ultima, come i risultati di qualsiasi altro calcolo, è una conseguenza necessaria di premesse definite, ed è confermata, nella misura in cui queste sono corrette dagli esperimenti, purché siano state fatte un numero sufficiente di osservazioni, come è sempre il caso nella teoria meccanica del calore dato il numero enorme di molecole che sono coinvolte. È solo doppiamente necessario maneggiare le conclusioni col massimo rigore. Se non ci si vuole limitare solo a congetturare pochi valori occasionali delle quantità che intervengono nella teoria dei gas, ma si vuole piuttosto disporre di una teoria esatta, si deve allora in primo luogo determinare le probabilità dei vari stati che una data molecola assumerà durante un tempo molto lungo, o che molecole diverse avranno nello stesso tempo. In altre parole, si deve trovare il numero di molecole rispetto al numero totale i cui stati giacciono tra limiti fissati. Maxwell ed io abbiamo trattato in passato questo problema in molti lavori, senza proporci fin'ora di trovare per esso una soluzione completa. Infatti, il problema sembra essere molto difficile nel caso in cui ciascuna molecola consiste di molti punti-massa (atomi), dal momento che non si possono integrare le equazioni del moto anche per un complesso di tre atomi. Tuttavia da un esame più accurato, non appare improbabile che queste probalità si possano ottenere dalle sole equazioni del moto, senza doverle integrare. Giacché le molto semplici leggi dei gas mostrano che le espressioni per queste probabilità devono avere certe proprietà generali indipendenti dalla natura particolare del gas, e queste probabilità generali possono spesso essere dedotte dalle equazioni del moto, senza la necessità di integrarle. Infatti, sono riuscito a trovare la soluzione per molecole gassose costituite da un numero arbitrario di atomi. Tuttavia, per una

migliore veduta d'insieme dell'argomento tratterò dapprima il caso più semplice, dove ogni molecola è un singolo punto-massa. Tratterò successivamente il caso generale, per il quale il calcolo è simile. [...]
Abbiamo quindi dimostrato rigorosamente che, qualunque sia la distribuzione iniziale dell'energia cinetica, nel corso di un tempo molto lungo essa deve sempre necessariamente tendere verso quella trovata da Maxwell [16]. Il procedimento usato finora naturalmente non è altro che un artificio matematico utilizzato allo scopo di fornire una dimostrazione rigorosa di un teorema la cui dimostrazione esatta non è stata trovata in precedenza. Esso acquista maggiore significato per la sua applicabilità alla teoria delle molecole gassose poliatomiche. Là si può dimostrare nuovamente che una certa quantità E [17] può solo decrescere in conseguenza del moto molecolare, o in un caso limite può rimanere costante. Si può dimostrare anche che per il moto atomico di un sistema composto di un numero arbitrariamente grande di punti materiali esiste sempre una certa quantità che, come conseguenza di qualsiasi movimento atomico, non può crescere, e questa quantità coincide a meno di un fattore costante col valore trovato per il ben noto integrale $\int dQ/T$ [18] nel mio lavoro sulla « Dimostrazione analitica della seconda legge, ecc. ». Abbiamo quindi aperto la via ad una dimostrazione analitica della seconda legge [della termodinamica] in un modo completamente diverso da quelli indagati finora. Finora l'obiettivo era stato di mostrare che $\int dQ/T = 0$ per processi ciclici reversibili, ma non è stato mostrato analiticamente che questa quantità è sempre negativa per processi irreversibili, che sono i soli che avvengono in natura. Il processo ciclico reversibile è solo un ideale, che si può approssimare più o meno bene ma che non si può mai raggiungere. Qui, tuttavia, siamo riusciti a provare che $\int dQ/T$ è in generale negativo, ed è uguale a zero solo per il caso limite, che è naturalmente il processo ciclico reversibile (dal momento che se si può percorrere il processo in entrambe le direzioni, $\int dQ/T$ non può essere negativo). [Boltzmann (132)]

16 È la distribuzione di equilibrio di Maxwell-Boltzmann.

17 È quella che viene comunemente denotata come funzione H e le cui principali proprietà abbiamo riassunto anche nella scheda esplicativa.

18 È questa la ben nota espressione matematica legata alle variazioni di entropia.

Capitolo terzo

PROGRESSI E SVOLTE NELLA CHIMICA

Fin dalla sua nascita come scienza, nel corso del '700, la chimica era stata direttamente legata a precise necessità produttive (in particolare a quelle dell'industria tessile: candeggio e trattamento delle fibre, tintura dei tessuti, ecc.) ed aveva anzi tratto principalmente da esse ispirazione, linfa e motivazioni concrete per affinare il proprio metodo. Nel corso della prima metà dell'800 tali legami si erano fatti via via più stretti, pur rimanendo sempre nel quadro di un rapporto tra scienza e tecnica che vedeva una netta subordinazione della prima alla seconda, con un'accentuazione ed un ritardo maggiori — semmai — nel caso della chimica rispetto a quello della fisica.

Le profonde ristrutturazioni della compagine sociale e produttiva che si verificano nella seconda metà del secolo e la conseguente maturazione di compiti radicalmente nuovi per le scienze, non possono ovviamente mancare di influenzare anche gli sviluppi della chimica, in modo simile a quanto abbiamo documentato per la fisica. Anche se persiste nel corso del ventennio che stiamo analizzando un innegabile ritardo di tutte le altre discipline scientifiche rispetto a quelle fisiche, metteremo ugualmente in luce nel presente capitolo come, anche nel settore delle ricerche chimiche, cadano definitivamente le prevenzioni di ispirazione positivistica contro l'uso di modelli ed ipotesi teoriche, e prenda anzi forma una metodologia che ne riconosce la fecondità e pone il loro uso alla base dell'indagine. Per comodità ci limiteremo qui a documentare questa svolta per i soli due settori della teoria atomica e molecolare e della chimica organica, riservando per la chimica-fisica (che pure nasce ed affina i suoi metodi a partire da ora) una trattazione compatta nel cap. VIII (questo sia perché è soprattutto nel periodo successivo che si verificano gli sviluppi più significativi, sia anche perché tali

sviluppi rivestono un interesse più diretto per l'analisi della svolta della fisica tra '800 e '900).

Va detto peraltro che i progressi della chimica nel periodo che stiamo considerando si iscrivono in un'evoluzione che tende di fatto a fare di questa disciplina scientifica il cardine dei rivoluzionari sviluppi produttivi della *seconda rivoluzione industriale* e quindi anche — per la centralità dei problemi che essa affronterà e delle soluzioni proposte — il punto di riferimento centrale per gli sviluppi delle problematiche fisiche e della metodologia scientifica nel suo complesso. Vedremo in particolare come tali sviluppi configureranno di fatto il superamento del meccanicismo e quindi del fondamento unitario della scienza ottocentesca; a questo proposito occorre anche anticipare che un ruolo d'avanguardia in questo contesto sarà svolto dalla scienza tedesca, di quel paese cioè in cui la seconda rivoluzione industriale avrà il suo carattere più dirompente, e per questo cercheremo fin d'ora di mettere in luce quei contributi allo sviluppo della chimica che maturano proprio in Germania e ai quali dovremo poi fare spesso riferimento in seguito.

III.1. *L'affermarsi della teoria atomica e molecolare*

Agli inizi dell'800 si era aperto a proposito dell'ipotesi della costituzione atomica della materia un vivace dibattito che, con la successiva caduta di interesse dopo il 1830 e la ripresa verso gli anni '50, conferma sostanzialmente la periodizzazione che abbiamo fatto per lo sviluppo della fisica in relazione alle svolte strutturali nel corso del secolo.

È noto che fu l'inglese John Dalton (1766-1844) ad avanzare per primo una teoria atomica fondata su una concreta base scientifica, costituita da un lato dalla legge di conservazione della massa nelle reazioni chimiche — messa in luce da Lavoisier — e dall'altro dall'osservazione che le sostanze si combinano chimicamente secondo rapporti in peso definiti e regolari (leggi delle proporzioni definite e delle proporzioni multiple). Secondo la teoria di Dalton i diversi elementi chimici sono composti di atomi isolati che, aggregandosi tra loro nel modo più semplice possibile, determinano la formazione delle molecole dei vari composti. Così, ad es., l'acqua si otterrebbe dalla combinazione di un atomo di idrogeno e di uno di ossigeno, secondo la reazione $H + O \rightarrow HO$.

Nel 1808 Dalton aveva anche pubblicato una prima tabella dei pesi atomici che discendeva direttamente dalle ipotesi connesse alla sua teoria e dalle conoscenze dell'epoca. Ovviamente i valori riportati nella tabella erano molto diversi da quelli oggi accertati e la stessa teoria di Dalton era tutt'altro che esente da grosse contraddizioni, anche rispetto ai risultati sperimentali che si andavano accumulando. Sempre nel 1808, ad esempio, il francese J. Gay-Lussac (1778-1850) aveva ottenuto la legge che porta il suo nome, secondo la quale due sostanze gassose si combinano tra loro secondo rapporti di volume espressi da piccoli numeri interi. Da tale legge non era difficile ricavare, qualora si ritenesse valida la teoria atomica, la conseguenza che volumi uguali di gas diversi (semplici o composti) devono contenere lo stesso numero di particelle: conseguenza che del resto era suffragata anche dal fatto che tutti i gas mostrano lo stesso comportamento rispetto alle variazioni di temperatura e di pressione.

La mancata distinzione tra atomi e molecole causava però delle grosse contraddizioni tra questa conclusione ed i pesi atomici riportati da Dalton, tanto che quest'ultimo respinse la legge dei volumi [1]. Come esempi di tali contraddizioni, possiamo citarne due dello stesso Dalton. In primo luogo il fatto che il vapor d'acqua è meno denso dell'ossigeno e quindi se volumi uguali contengono lo stesso numero di particelle di vapore acqueo (che per Dalton sono del tipo HO) e di ossigeno (che sarebbero gli stessi atomi di ossigeno: O) questo implica che una particella di vapore è più leggera di una di ossigeno: ma come può accadere, dato che la prima si otterrebbe aggiungendo un atomo di idrogeno? Per il secondo esempio citiamo lo stesso Dalton: « Ammettiamo che

[1] È interessante notare il fatto che Dalton mette in evidenza che i risultati sperimentali di Gay-Lussac mostrano delle divergenze rispetto ai semplici rapporti tra numeri interi che sono talvolta dell'ordine del 6-8%. Mentre quest'ultimo non considerava significative tali divergenze, attribuendole ad errori sperimentali, Dalton al contrario le adduceva a prova *contro* la legge dei volumi. Lo stesso Dalton, d'altra parte, aveva trascurato divergenze dello stesso ordine per discutere la sua legge sulle proporzioni multiple. Si ha qui una prova di come gli stessi « fatti oggettivi » (e soprattutto le incertezze, vere o presunte, su di essi) possano venire interpretati in modi profondamente diversi nel contesto di diverse ipotesi teoriche generali, e condurre quindi a conclusioni contrastanti per diverse linee di ricerca, in luoghi e con obiettivi diversi (cfr. Arons [26], p. 685).

in un volume di azoto [N] vi siano tanti atomi quanti in un volume di ossigeno [O]; ma se una molecola di ossido di azoto [NO] è formata da un atomo di ossigeno ed uno di azoto, si dovrebbe ottenere un volume di ossido e invece se ne hanno due. L'ossido di azoto dovrebbe avere dunque in uno stesso volume la metà di particelle che hanno l'azoto e l'ossigeno ».

La soluzione di queste contraddizioni era stata avanzata per la prima volta da Amedeo Avogadro (1776-1856) nel 1811 e tre anni dopo, indipendentemente, da Ampère: questa consisteva nell'accettare la conclusione che uguali volumi di gas contengono lo stesso numero di particelle, ma al tempo stesso nel supporre che queste ultime, anche nel caso di elementi semplici, siano composte da più atomi. Questa distinzione tra l'*atomo* di un elemento (che entra nella formazione dei composti) e la sua *molecola* (cioè la particella più piccola che conserva tutte le proprietà fisiche della sostanza) permetteva di risolvere la contraddizione tra l'ipotesi atomica e la legge di Gay-Lussac. La reazione di formazione dell'acqua sarebbe infatti $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$, quella dell'ossido di azoto $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$. Così si esprimeva Ampère:

> Quali che siano le ragioni teoriche che sembrano rafforzare la mia supposizione, essa non può essere considerata che come un'ipotesi.
> Comparando però le conseguenze che necessariamente ne derivano con i fenomeni e le proprietà che noi osserviamo, se essa si accorda con tutti i dati sperimentali, se se ne deducono conseguenze che sono confermate da esperienze ulteriori, essa potrà acquistare un grado di probabilità assai vicino a ciò che in fisica si chiama *certezza*. [Ampère (127)]

Si osservi qui come Ampère, di cui abbiamo già sottolineato l'aderenza ad un ideale scientifico positivistico, mostri un'estrema cautela nel formulare un'ipotesi, pur riconoscendone in questo caso la fecondità e l'aderenza ai fatti sperimentali[2].

I tentativi di costruire una coerente teoria atomica proseguono con convinzione almeno per una quindicina d'anni:

[2] Ciò conferma ulteriormente che occorre molta cautela nell'uso di termini generali quale quello di *positivismo*: cfr. a questo proposito la nota 1 del cap. II.

lo svedese J. J. Berzelius (1779-1849) ad esempio, pur respingendo l'ipotesi di Avogadro-Ampère, aveva perseguito un vasto programma sperimentale per determinare i pesi atomici, giungendo però a valori che erano spesso il doppio o il quadruplo di quelli effettivi, proprio per l'incapacità di distinguere tra atomo e molecola[3]. W. Prout (1785-1850) era addirittura arrivato nel 1815 all'idea che tutti i pesi atomici fossero multipli di quello dell'idrogeno e che quindi tutti gli atomi fossero aggregazioni di atomi d'idrogeno: tale ipotesi era però stata contraddetta dalle misure di Berzelius, Dumas e Stas. Nel 1819 P. L. Dulong (1785-1838) e A. T. Petit (1791-1820) avevano annunciato la loro scoperta che tutti i corpi solidi hanno lo stesso calore atomico[4] ed avevano concluso che « gli atomi di tutti i corpi semplici hanno esattamente la stessa capacità per il calore » (cit. in Scott [96], p. 212). Questa legge consentiva di calcolare il peso atomico dei diversi elementi dividendo il calore atomico — il cui valore è 6,15 per tutti — per il calore specifico, ma soprattutto legava in maniera diretta i fenomeni termici alla costituzione microscopica della materia. In una lettera a Berzelius (il quale, sulla base della nuova scoperta, dovette rivedere alcuni dei suoi pesi atomici) Dulong dice della teoria atomica che « questa teoria è la più importante concezione del secolo e nei prossimi vent'anni essa sarà integrata in tutte le branche della fisica realizzando un arricchimento incalcolabile » (cit. in Scott [96], p. 215).

In linea di principio sembrava dunque possibile nei primi decenni del secolo — malgrado le persistenti difficoltà di stabilire univocamente i valori dei pesi atomici e le formule molecolari — costruire una teoria coerente sulla costituzione atomica e molecolare della materia sulla base delle ipotesi di Dalton e di Avogadro-Ampère e del materiale sperimentale che si andava accumulando. Ed invece, nel clima positi-

[3] Berzelius interpretava la tendenza degli atomi a combinarsi tra loro come un'attrazione elettrica (teoria dualistica). I filosofi della natura del romanticismo tedesco avevano già avanzato in maniera astratta e speculativa quest'idea, consona alla tendenza di vedere nelle realizzazioni della natura delle unità di entità opposte. Una tale teoria era in contrasto con l'ipotesi di Avogadro e Ampère, giacché atomi dello stesso elemento avrebbero dovuto avere la medesima carica elettrica e quindi non avrebbero potuto formare molecole binarie.

[4] È la quantità di calore necessaria per elevare di un grado la temperatura di una quantità di sostanza pari al suo peso atomico. Esso si ricava moltiplicando il calore specifico per il suo peso atomico.

vistico di ostilità verso l'uso di ipotesi e di fedeltà assoluta all'esteriorità dei fatti empirici, anche i chimici rinunciarono dopo il 1830 a perseguire una sintesi teorica coerente su queste basi, pur continuando ad usare la parola 'atomo' per identificare in qualche modo i costituenti ultimi della materia. Per i più gli « atomi » rappresentavano soltanto un modo di esprimere dei rapporti numerici di carattere empirico, mentre i dati relativi alle reazioni chimiche, così come le formule molecolari, venivano espressi in termini di pesi equivalenti piuttosto che in termini di pesi atomici (il « peso equivalente » di un elemento denota solo la quantità in peso di tale elemento che si combina con 1 grammo di idrogeno e rappresenta quindi un semplice « dato » dell'esperienza). Proprio negli anni '30 Faraday, nei suoi studi sull'elettrolisi, trova che uguali intensità di corrente liberano in uno stesso intervallo di tempo agli elettrodi di celle elettrolitiche diverse quantità di sostanze che sono proporzionali ai rispettivi pesi equivalenti, confermando in tal modo una relazione diretta della carica elettrica con le quantità equivalenti dei corpi, piuttosto che con gli ipotetici pesi atomici di Dalton e di Berzelius.

Con lo sviluppo della chimica organica matura però attorno alla metà del secolo l'esigenza di costruire una teoria atomico-molecolare. Nel caso dei composti minerali e inorganici, infatti, la conoscenza delle formule molecolari è relativamente di minore importanza e può essere sufficiente la conoscenza dei pesi equivalenti; i composti organici, al contrario, sono formati da un piccolo numero di elementi (carbonio, che è il costituente fondamentale, idrogeno, ossigeno, azoto e pochi altri), ma sono in numero grandissimo ed esistono in molte varietà diverse: in moltissimi casi le proporzioni in peso dei diversi elementi sono le stesse per tutta una serie di composti che hanno invece proprietà fisiche completamente diverse e differiscono quindi proprio per il numero di atomi presenti nella molecola e per la loro disposizione [5]. È chiaro quindi che la conoscenza del peso equivalente del carbonio o degli altri elementi non è affatto sufficiente per identificare in modo univoco i diversi composti o prevederne le proprietà. Come vedremo al § III.2, tutti i tentativi di classificazione proposti per met-

[5] Ad esempio i diversi idrocarburi non saturi (etilene, propilene, ecc.) contengono tutti idrogeno e carbonio nelle proporzioni 1:6, in quanto le formule molecolari della serie sono del tipo C_nH_{2n}.

tere ordine nella grande varietà dei composti organici erano rimasti sterili proprio per l'impossibilità di inquadrarli in un contesto generale che superasse i meri aspetti fenomenologici.

Nella situazione post-quarantottesca si determinano però — come abbiamo già documentato nel caso della fisica — condizioni più favorevoli ad un salto qualitativo dell'indagine scientifica, della sua metodologia e dei suoi obiettivi di controllo dei fenomeni naturali. È in questo nuovo clima che, parallelamente alla definitiva accettazione della concezione meccanica del calore e allo sviluppo in forma coerente della teoria cinetica dei gas, si prepara anche il terreno per una ripresa della teoria atomico-molecolare, in termini profondamente mutati, come teoria cioè capace sia di una sistemazione coerente ed unitaria del quadro fenomenologico, sia di predire aspetti nuovi.

Nel settembre del 1860 viene convocato a Karlsruhe il primo Congresso internazionale di chimica, proprio con l'obiettivo di risolvere il problema dei pesi atomici e delle formule molecolari, divenuto ormai una necessità indilazionabile anche per lo sviluppo ulteriore di un'industria chimica. Vi prendono parte circa 140 chimici di tutta l'Europa: dalla Francia vengono Dumas e Wurtz, dall'Inghilterra Frankland e Roscoe, dalla Russia Mendeleev, ecc.; e sono ovviamente presenti tutti i migliori chimici tedeschi, da Liebig a Wöhler e ai loro allievi, Kolbe, Bunsen, Kekulè, ecc.

In quella sede viene distribuito un opuscolo che contiene la copia di una memoria pubblicata due anni prima sulla rivista scientifica italiana « Il Nuovo Cimento » da Stanislao Cannizzaro (1826-1910), professore di chimica all'università di Genova (Cannizzaro [143]). La memoria, di cui riportiamo alcuni brani in Appendice, è in realtà una lettera in cui l'autore descrive il corso di lezioni di chimica da lui tenute all'università e il procedimento esposto è esemplare per la sua linearità. Cannizzaro parte dall'accettazione dell'antica ipotesi di Avogadro-Ampère e mostra come sia possibile, sulla base dei dati esistenti sulle densità gassose, spiegare in maniera univoca e coerente tutti i fenomeni chimici conosciuti e nello stesso tempo fornire un sistema semplice e unitario per rappresentare le formule molecolari. Scriverà più tardi il chimico tedesco Lothar Meyer, uno dei partecipanti al Congresso: « [...] restai stupito per la chiarezza con cui l'opuscolo illuminava i punti più importanti della controversia. Delle croste mi sembravano cadere dagli occhi. I dubbi spa-

rivano ed una sensazione di tranquilla certezza prendeva il loro posto [...]. Questo deve avere colpito nello stesso modo molti altri partecipanti al Congresso. Le onde burrascose della controversia cominciarono a placarsi e gli antichi pesi atomici di Berzelius ritornarono alla luce » (cit. in Arons [26], p. 697).

In realtà la situazione rimane per il momento piuttosto confusa in quanto i simboli chimici che vengono impiegati per rappresentare le reazioni denotano per alcuni il peso equivalente dell'elemento, per altri il peso atomico, per altri ancora la molecola o una frazione di molecola. Anche dal punto di vista dell'interpretazione dei risultati la confusione è accentuata dal mancato riconoscimento del significato della valenza. Per comprendere però l'importanza della proposta di Cannizzaro si tenga presente che, come vedremo, nello stesso anno in cui egli la elabora il chimico tedesco A. Kekulè dimostra la tetravalenza del carbonio e si cominciano altresì ad introdurre le prime formule di struttura [6].

Matura in definitiva, soprattutto in Germania, la consapevolezza che le proprietà fisico-chimiche dei composti organici sono legate specificamente alla loro configurazione molecolare (cfr. il § sg.) e a partire proprio dagli anni '60 la chimica organica troverà nella teoria atomico-molecolare lo strumento più efficace per svilupparsi rapidamente. Il fatto che, come vedremo in dettaglio, questi sviluppi si leghino molto strettamente ed efficacemente alla crescita impetuosa ed estremamente qualificata di una grossa industria chimica organica in Germania spiega come i chimici di questo paese siano i più convinti sostenitori della teoria atomica e riescano a farne la base per un progresso che non trova confronti negli altri paesi.

La situazione è infatti completamente diversa in Francia dove, anche per il prestigio e l'influenza di Berthelot, si con-

6 La maturità della scelta della teoria atomica è testimoniata — per non fare che un esempio — dalla decisione con cui lo stesso Cannizzaro difende qualche anno dopo l'ipotesi cinetica dagli attacchi del francese Hirn: « Non so astenermi dal manifestare la soddisfazione con la quale i chimici accolgono questa nuova vittoriosa risposta di Clausius alle obiezioni di Hirn contro la teoria cinetica dei gas; poiché di tali obiezioni negli ultimi tempi alcuni scienziati francesi si fecero armi rivolte contro le dottrine della chimica moderna; le quali hanno il più solido fondamento sul concetto della simile costituzione molecolare dei fluidi aereiformi in eguali condizioni di temperatura e pressione: concetto ora rischiarato e raffermato dalla teoria cinetica dei gas, di cui divenne il primo corollario » (Cannizzaro [144], p. 359).

inua ad usare la notazione basata sugli equivalenti chimici, iconoscendo solo per alcuni casi la *convenienza* dell'uso delle ormule basate sui pesi atomici (soprattutto in chimica orga-ica). Ancora nel 1876, dopo avere discusso i presupposti ella teoria ed avere confrontato i vantaggi e gli svantaggi ei due tipi di notazione, Berthelot si esprime in modo nequivocabile contro la teoria atomica.

M. BERTHELOT
Sulla teoria atomica

Riassumendo, queste due notazioni, lo ripeto, offrono entrambe dei vantaggi e degli inconvenienti; ma guardiamoci dall'illusione che i progressi della scienza siano dovuti all'uso esclusivo di una di esse. Troppo spesso i chimici, anche i più abili, sono portati ad attribuire alle virtù del linguaggio che essi impiegano delle scoperte dovute in realtà alla forza delle loro stesse concezioni. [...]
In effetti, il maggior rimprovero che si possa rivolgere alla teoria atomica, come a tutte le concezioni analoghe, è che esse portano ad operare sui rapporti numerici degli elementi e non sui corpi stessi, in quanto riconducono tutte le reazioni ad un'unità tipo, necessariamente immaginaria. In breve, esse sottraggono ai fenomeni ogni carattere reale, e sostituiscono alla loro esposizione autentica una successione di considerazioni simboliche, con le quali lo spirito si compiace, perché vi si esercita con maggiore facilità che sulle realtà propriamente dette. Le pretese e gli effetti di simili teorie non sono affatto privi di analogia con quelle macchine sillogistiche, inventate nel Medioevo allo scopo di ricondurre tutte le domande e tutti i problemi ad un certo numero di categorie logiche, determinate in anticipo: dalle quali derivava in modo necessario la loro soluzione razionale.
I simboli della chimica presentano sotto questo aspetto delle strane seduzioni, a causa della facilità algebrica delle loro combinazioni e delle tendenze dello spirito umano, portato per sua natura a sostituire alla concezione diretta delle cose, in parte sempre indeterminata, il punto di vista più semplice, e in apparenza più completo, dei loro segni rappresentativi. Sarebbe disconoscere stranamente la filosofia delle scienze naturali e sperimentali attribuire a simili meccanismi una portata fondamentale. In effetti,

nello studio delle scienze, tutto consiste nella scoperta di fatti generali, e in quella delle leggi che li collegano gli uni agli altri. Poco importa il linguaggio attraverso il quale le si esprimono, e che così spesso fa supporre ciò che non è, anche agli autori delle scoperte. Il linguaggio è un problema di esposizione, più che di vera invenzione: i segni hanno valore solo per i fatti di cui sono l'immagine. Ora le conseguenze logiche di un'idea non cambiano per nulla, qualunque sia il linguaggio nel quale le si traduce. Pure è più facile di quanto comunemente non si creda costruire a cose fatte e con l'aiuto di procedimenti di questo genere una teoria che si pretende razionale, adatta a raggruppare sotto segni nuovi tutto un insieme di fatti, i cui legami generali erano già stati riconosciuti e precisati attraverso esperienze precedenti. Ma questa costruzione non costituisce di per se stessa alcuna scoperta; non più di quanto la traduzione di un capolavoro letterario non equivalga alla sua invenzione. Checché se ne dica, le discussioni che si potrebbero avviare al riguardo non concernono per nulla le dottrine fondamentali della scienza. Troppo spesso nella nostra scienza si sono designate col nome di sistemi nuovi, di teorie nuove, delle variazioni individuali, e talvolta poco importanti dei simboli atomici o equivalenti, che si destinavano a rappresentare i medesimi fatti, le medesime analogie, le medesime generalizzazioni espresse fino allora sotto forma di linguaggio appena diverso e accettato da tutti. Ora, occorre sottolinearlo, queste continue variazioni dei segni sono più nocive che utili ai veri progressi della chimica organica. Esse snaturano i legami che ricollegano le sue concezioni alle leggi più generali della chimica generale; esse oscurano di continuo la regolare filiazione delle idee e la successione progressiva delle scoperte; infine esse tendono a privare la chimica del suo vero carattere.

In effetti, quasi tutti i sistemi costruiti in chimica organica da quarant'anni a questa parte presentano questo carattere comune e singolare di essere fondati quasi esclusivamente sulla combinazione dei segni e delle formule. Si tratta di teorie di linguaggio e non di teorie di fatti, mentre solo queste ultime costituiscono delle vere teorie. È pure successo molto spesso ai chimici di assumere le proprietà dei numeri, nascoste nelle loro formule, per le proprietà misteriose dei veri esseri: illusione analoga

a quella dei Pitagorici, ma forse meno giustificata dalla natura delle scienze sperimentali. Si potrebbero cercare le ragioni storiche di questa scolastica, sia nel carattere astratto sotto il quale gli esseri e i loro elementi vengono esaminati dal punto di vista chimico, sia nelle origini della chimica attuale. [Berthelot (128), pp. 166-71]

A riprova del profondo contrasto tra queste posizioni, largamente dominanti in Francia, ed il diverso livello dell'indagine chimica diffusosi in Germania, è sufficiente rilevare la ben diversa consapevolezza che traspare nelle seguenti pagine di A. W. Hofmann (1818-1892), il chimico tedesco chiamato a dirigere per vent'anni il Royal College of Chemistry di Londra e che sarà, come vedremo, uno dei protagonisti dello sviluppo scientifico e industriale tedesco nel settore della chimica.

A. W. HOFMANN

L'utilità delle ipotesi teoriche nella scienza

In tutto il cammino che abbiamo percorso finora non uscimmo mai dal campo dell'esperienza: il nostro interesse si limitò esclusivamente a fatti dei quali prendevamo conoscenza o mediante esperimenti da noi stessi eseguiti o mediante l'altrui autorevole testimonianza. Ci siamo accontentati di osservare i fenomeni chimici, di raccogliere i risultati della nostra osservazione, ordinarli e paragonarli tra loro senza però cercare mai di spiegarli.
Le cause degli effetti osservati ci sono finora rimaste estranee. Ma ci sentiamo nullameno spinti irresistibilmente alla indagine di siffatte cause, da una delle più forti tendenze della nostra natura intellettuale. Questo istintivo spirito di indagine non può mai essere completamente soddisfatto. La causa prima d'ogni fenomeno supera i confini della nostra capacità intellettiva. La determinazione delle condizioni sotto cui i fenomeni si formano, della successione nella quale essi si presentano, la loro analogia o la loro dissomiglianza, infine la loro concatenazione sono altrettanti scopi dell'indagine: non è a sperarsi che si giunga mai ad una chiara intelligenza della causa prima dei fenomeni e della loro natura. Ma anche la soluzione di quei problemi che non escono dalla cerchia a noi accessibile, presenta difficoltà d'ogni genere. Anzi talvolta non

riusciamo a superare tali ostacoli che ammettendo dietro certe presupposizioni i suggerimenti della nostra fantasia col soccorso dei quali colleghiamo insieme una serie di osservazioni e di esperimenti isolati. Ravvisando mediante tali presupposizioni le lacune delle nostre cognizioni, siamo subito posti sulla via di colmarle con nuove osservazioni ed indagini. Se tali osservazioni o tali esperimenti conducono ai risultati che ci potevamo aspettare secondo le poste presupposizioni, abbiamo in tal modo già fatto un grande passo verso la giusta intelligenza di un fenomeno. Tali supposizioni si chiamano appunto ipotesi (dal greco *ypò* sotto, e *thesis* derivato da *tithemi* pongo).
L'ipotesi è uno dei più pregevoli sussidi dell'indagine scientifica; ma nella maggior parte dei casi essa non ha che un'utilità temporaria, poiché deve essere estesa o ben anco deve essere abbandonata secondo che, per i risultati della continuata indagine, diventa troppo angusta oppure cessa di essere la esatta interpretazione dei fatti. D'altra parte se l'ipotesi abbraccia e spiega serie estese di fenomeni e se cogli esperimenti continuati vengono alla luce i risultati che l'ipotesi stessa aveva già messo in vista, se inoltre per le scoperte fatte si innalza più e più sulla scala della probabilità, essa perde il suo carattere provvisorio per associarsi alla fine col nome e col rango di una teoria (da *theorèo* osservo) alle dottrine riconosciute della scienza.
La riunione degli elementi nel rapporto dei loro pesi di combinazione o di multipli semplici dei medesimi può essere spiegata mediante un'ipotesi che noi incliniamo ad accettare come una *teoria* per la sua grande verosimiglianza. Senza perderci troppo nella pura speculazione, dobbiamo ora occuparci attentamente di tale teoria, alla cui intelligenza ci hanno già preparato tanto gli esperimenti che già conosciamo, quanto i simboli coi quali ne abbiamo espresso i risultati. [Hofmann (160), p. 212]

Come si vede, il superamento della metodologia positivistica è un processo tutt'altro che lineare e omogeneo nei diversi settori della scienza e nei diversi paesi. Due scienziati che potremmo definire « di transizione » e anche fortemente rappresentativi, quali Berthelot e Hofmann, esprimono pienamente le caratteristiche profondamente diverse degli am-

bienti culturali e produttivi nei quali si trovano ad operare: la Francia, dove la relativa stasi produttiva è destinata a prolungarsi ancora a lungo, e la Germania, che si avvia invece, come vedremo, a divenire la protagonista di trasformazioni produttive rivoluzionarie.

Possiamo concludere questo paragrafo ricordando infine che l'accettazione della teoria atomica e la precisazione del significato della valenza guidano la ricerca sul problema della classificazione degli elementi, la cui soluzione viene proposta contemporaneamente e indipendentemente dal russo D. Mendeleev (1834-1907) e dal tedesco L. Meyer (1830-1895) nel 1869, facendo rivivere l'antica ipotesi di Prout sulla fondamentale unicità della materia di cui sono costituiti tutti gli atomi. Commemorando, nel 1893, il venticinquesimo anniversario della fondazione della Società chimica di Berlino, W. Wislicenus dirà a questo proposito:

> Le imperfezioni [della tavola periodica] finiranno tutte per scomparire; perché questa questione tocca uno dei problemi la cui soluzione non ha mai smesso di essere perseguita dallo spirito umano: arriveremo a dimostrare che gli elementi non sono cose esistenti per l'eternità, ma che sono stati formati ad un dato momento attraverso modificazioni di una materia primordiale? Conosceremo mai la legge che regola la loro formazione? Domande su cui l'immaginazione e la fantasia poetica possono lasciarsi andare liberamente, che non siamo più in diritto di trattare come pure chimere. Non appare forse, di giorno in giorno sempre più distintamente, al nostro occhio armato dello spettroscopio, che certe pallide luci che irradiano dalle più profonde lontananze dell'infinito ci rendono ancora testimoni, noi, gli ultimi venuti della creazione, della formazione di mondi e di elementi! [Wislicenus (204)]

III.2. *Gli sviluppi della chimica organica*

Per lungo tempo il problema delle sostanze organiche era rimasto invischiato entro concezioni di carattere vitalistico o metafisico, dalle quali si cominciò lentamente ad uscire nel corso della prima metà dell'800 con l'accumularsi delle conoscenze su di esse e con la diffusione di un metodo d'indagine

più rigoroso. Scriveva Berzelius nel suo *Trattato di chimica*: « Nella natura vivente gli elementi sembrano obbedire a leggi del tutto diverse da quelle della natura inorganica: i prodotti che risultano dall'azione reciproca di questi elementi differiscono dunque da quelli che ci presenta la natura inorganica. Se si potesse riconoscere la causa di questa differenza si avrebbe la chiave della teoria della chimica organica; ma questa teoria è talmente nascosta che noi non abbiamo, almeno per ora, alcuna speranza di scoprirla » (cit. in Berthelot [128], p. 18).

La strada per riconoscere nei composti organici l'azione di quelle stesse forze responsabili della formazione dei composti inorganici doveva ancora essere lunga e passare in definitiva attraverso l'accettazione della teoria atomico-molecolare. Per il momento i chimici avevano imparato a decomporre le sostanze organiche e a riconoscerne attraverso l'analisi gli elementi costitutivi. In particolare, agli inizi degli anni '30 J. Liebig (1803-1873) aveva introdotto un metodo d'analisi particolarmente preciso per determinare le proporzioni di carbonio e idrogeno ed una decina di anni dopo si era imparato a dosare l'azoto. A differenza però delle sostanze inorganiche, che potevano essere facilmente sintetizzate in laboratorio, quelle organiche sembravano sfuggire a questa possibilità. L'esempio dell'urea, sintetizzata da Wöhler nel 1828 (« posso fare l'urea senza bisogno di reni e nemmeno di un animale, sia uomo o cane »), pur essendo significativo, era rimasto un caso pressoché isolato e riguardava un composto che si poneva ai livelli più bassi della scala delle sostanze che riguardano la vita. Il francese Gerhardt, del cui sistema di classificazione parleremo tra breve, era convinto ad esempio che le sintesi organiche che si osservano in natura fossero dovute « all'azione misteriosa di una forza vitale » e aveva aggiunto: « Io qui dimostro che la chimica fa tutto l'opposto della natura vivente, che essa brucia, distrugge, separa per analisi; che solo la forza vitale opera per sintesi, che essa ricostruisce l'edificio abbattuto dalle forze chimiche » (cit. in Berthelot [128], p. 18).

La situazione muta però abbastanza rapidamente anche nel settore della chimica organica a partire dalla fine degli anni '40. La sintesi degli idrocarburi e degli alcoli consente di individuare e delimitare il campo d'indagine autonomo di questa disciplina, mentre si sviluppa anche l'industria con-

nessa a questa branca (cfr. cap. VI). Una volta superata l'idea della « forza vitale » cade definitivamente la barriera che fino ad allora aveva separato la chimica organica da quella inorganica; si pongono così anche le basi perché la prima sviluppi gradualmente la capacità di sintetizzare non soltanto le principali sostanze naturali, ma tutta una serie di sostanze nuove destinate a rivoluzionare profondamente la vita sociale e l'assetto produttivo: dai coloranti artificiali ai profumi, dai farmaci ai fertilizzanti, alle materie plastiche, e così via. Una delle tesi di fondo del presente saggio — per l'appunto — è che, proprio nelle specifiche mediazioni e connessioni che in questo settore in modo particolare si stabiliscono tra la ricerca scientifica e l'impetuoso sviluppo produttivo della seconda rivoluzione industriale, maturano e si definiscono quel tipo di tematiche nuove, di stimoli innovatori, di committenze impreviste, di procedimenti scientifici, in una parola quel *modo nuovo di produrre scienza*, che è alla base delle radicali trasformazioni che la scienza — e in primo luogo la fisica — subirà ai primi del '900. È in questa prospettiva che ci interessa qui particolarmente analizzare i progressi della chimica organica e le sue acquisizioni teoriche fondamentali, per vedere poi i nuovi processi tecnologici e produttivi che si originano e si sviluppano alla fine del secolo in connessione con esse. Al centro degli sviluppi più significativi sarà, come vedremo meglio, il nuovo impero germanico: è in questa luce che va interpretato il processo di progressiva concentrazione in questo paese del dibattito scientifico più avanzato, già a partire dal periodo di preparazione che stiamo qui esaminando.

Una prima proposta di sistemazione dotata di una certa coerenza e completezza viene avanzata nel 1844 dal francese M. C. Gerhardt (1816-1856) con la classificazione dei composti organici per *tipi strutturali*. Si tratta di una proposta che, nello spirito che la anima come nel metodo cui si ispira, rivela l'intento di perseguire un ordine di tipo empirico, autonomo da considerazioni modellistiche sulla struttura atomica delle molecole ed è in sostanza ancora interna all'orizzonte scientifico positivistico. Secondo Gerhardt — e qui sta un indubbio elemento di novità della sua concezione — i composti organici sono da mettere in relazione diretta con quelli inorganici più semplici e possono essere ricondotti a quattro tipi fondamentali, che sono l'idrogeno,

l'acqua, l'acido cloridrico e l'ammoniaca. Riportiamo un brano del trattato di Gerhardt da cui traspare con chiarezza la sua impostazione descrittiva, che pure segna già un primo passo avanti, nella volontà di attenersi ai fatti noti per organizzarli.

M. C. GERHARDT
La classificazione delle sostanze organiche

Le considerazioni precedenti conducono ad una comprensione esatta dei princìpi secondo cui è possibile classificare tutte le sostanze organiche in maniera semplice e comoda, *senza aver bisogno di ricorrere ad ipotesi, ma mantenendosi strettamente nei limiti dell'esperienza* [corsivo nostro].
Abbiamo già fatto notare che le proprietà chimiche presentano troppe ombre e non sono sempre abbastanza definite perché si possa differenziare con il loro aiuto tutti i composti organici; le denominazioni di ' acido ', ' base ', ' corpi indifferenti ' non sono sempre abbastanza precise; ci si trova spesso in imbarazzo quando si vuole definire il ruolo chimico di una sostanza, e bisogna allora aiutarsi considerando i caratteri fisici, distinguendo così le resine, i corpi grassi, gli oli essenziali. In una classificazione che coordini i fatti noti e preveda nello stesso tempo tutti i casi possibili, che si applichi quindi anche ai futuri progressi delle scienze, occorre ordinare le sostanze secondo la loro *somiglianza chimica*, classificarle indipendentemente dalle loro proprietà acide o alcaline, raggrupparle secondo il loro modo di formazione o di decomposizione in serie, ovvero, per servirci di un'espressione dei naturalisti, in famiglie naturali.
L'idea di costruire una specie di scala ci sembra soddisfare la speranza concepita molto tempo fa da Dumas di adattare alla chimica organica i princìpi su cui riposa la classificazione nel campo della storia naturale; questa disposizione in effetti precisa ulteriormente la teoria dei tipi indicando le differenti relazioni che le sostanze tipo presentano fra loro. Si tratta allora di stabilire qualche convenzione per marcare in questa scala i limiti delle serie. *Queste convenzioni non devono portare l'impronta di alcuna ipotesi* [corsivo nostro]; esse non possono basarsi in alcun modo su delle formule razionali con cui

si raggruppino gli elementi secondo qualche teoria particolare; occorre che esse soddisfino i chimici che professano le idee elettrochimiche allo stesso modo di quelli che respingono questa teoria. Occorre che queste convenzioni siano abbastanza semplici e precise perché qualsiasi chimico, anche il meno abile, possa, conoscendo solo la composizione e l'equivalente di una sostanza, assegnarle il posto che le compete nella scala. Occorre infine che la costruzione di questa scala sia tale da indicare, per ogni corpo, quali sono i prodotti che possono derivarne per via d'ossidazione, e quali sono quelli che può fornire per via di riduzione. In tal modo, data una sostanza organica, si sarà portati a considerare immediatamente il vantaggio che se ne può trarre per la riproduzione artificiale di altre sostanze. [Gerhardt (156), pp. 22-23]

La teoria dei tipi strutturali viene criticata in Germania da Kolbe: « Quanto sia falso che la natura si limiti a fare delle variazioni subordinate a quattro tipi lo dimostrano abbastanza, come feci notare prima d'ora, gli sforzi straordinari a cui sono costretti i seguaci di Gerhardt per sostenere il loro sistema. Si è riconosciuto che questi quattro tipi sono insufficienti per poterne derivare il gran numero dei composti organici, dalle proprietà le più differenti e dalla composizione la più svariata, e perciò s'inventarono i tipi derivati e misti dei quali alcuni si servono in modo che fanno della chimica un puro giuoco di formule » (Kolbe [165]).

Proprio in Germania si sviluppa una linea di ricerca che porterà ad individuare nella *valenza* la caratteristica che determina le possibili combinazioni molecolari. Il concetto di valenza, considerata unicamente come la proprietà degli atomi dei diversi elementi di combinarsi con uno o più atomi di idrogeno, insieme alla teoria atomica consentirà il balzo decisivo nella comprensione dei composti organici. Nel 1858 A. Kekulè (1829-1896) dimostra la tetravalenza del carbonio e anche gli altri elementi vengono classificati in rapporto alla nuova proprietà: monovalenti come l'idrogeno, bivalenti come l'ossigeno, trivalenti come l'azoto, tetravalenti appunto come il carbonio. Secondo questa concezione la valenza dei diversi atomi è una proprietà che appartiene loro indipendentemente dal fatto che siano o no legati ad altri atomi per formare una molecola e questo consente di ricostruire razionalmente

la complessità degli edifici molecolari[7]. È su queste nuove basi che negli stessi anni vengono introdotte le *formule di struttura* per le molecole, che consentono di distinguere le proprietà dei diversi composti non soltanto per il tipo e il numero di atomi presenti nella molecola, ma anche e soprattutto per la loro disposizione relativa. Si incomincia ora, insomma, a fare ricorso esplicito a *modelli* della molecola, assunti non già come astratte speculazioni, ma come considerazioni capaci di rendere conto delle proprietà note e di altre ancora da indagare dei composti chimici. Questa rottura rispetto alla tradizione della scienza chimica, di cui cercheremo di mettere in luce nel seguito tutta la potenzialità, si inserisce significativamente, come vedremo meglio, nel dinamismo della struttura economica e del sistema educativo tedesco.

È infatti a partire dagli anni '60 che comincia a svilupparsi una industria chimica completamente nuova, quella dei coloranti sintetici, che porrà ulteriori, pressanti esigenze all'elaborazione scientifica, vincolandola in modo sempre più indissolubile alla struttura produttiva e alle sue linee di sviluppo. Dal punto di vista chimico le materie coloranti sono composti organici appartenenti alla serie cosiddetta *aromatica*, il cui composto fondamentale è il *benzene* (raccogliamo nell'Appendice B del presente capitolo alcune nozioni fondamentali di chimica organica). Il problema della comprensione della formula di struttura del benzene diviene così un nodo di fondo per l'ulteriore sviluppo scientifico e industriale in questo settore, che si rivelerà poi quello trainante. Il problema viene risolto per l'appunto da Kekulè verso il 1865, con un'impostazione metodologica di cui vogliamo cogliere qui tutta la novità dal punto di vista scientifico.

Nel 1851 A. Kekulè (1829-1896) si era recato a Parigi per lavorare con Gerhardt; successivamente va a Londra ed un suo ricordo autobiografico ci testimonia come il livello della

[7] In realtà non mancano le contraddizioni in quanto molti elementi presentano a volte valenza diversa in composti differenti (si pensi ad esempio al carbonio stesso, che risulta tetravalente in tutti i composti organici e nella maggior parte di quelli inorganici, ma è bivalente nell'ossido di carbonio, CO); queste contraddizioni costituiscono uno degli elementi che determinano il rifiuto della teoria atomico-molecolare in Francia (cfr. ad es. Berthelot [128], pp. 154 e sgg.).

sua indagine, il tipo di problemi che egli si pone vadano già ben al di là dei limiti puramente fenomenologici:

> Durante la mia permanenza a Londra abitai per un certo tempo in Clapham Road, nelle vicinanze del Comune. Trascorrevo frequentemente, comunque, le mie sere a Islington, con il mio amico Hugo Müller, alla parte opposta della grande città. Chiacchieravamo di molte cose; ma, generalmente, discorrevamo della nostra amata chimica. Una bella sera d'estate stavo ritornando, come sempre con l'ultimo omnibus attraverso le strade deserte della metropoli, in altre ore tanto piene di vita. Mi lasciai prendere da fantasticherie e, guarda!, gli atomi stavano saltellando davanti ai miei occhi! Ogni volta che ancora queste piccolissime unità mi erano apparse, esse erano sempre in movimento; fino a quella volta, tuttavia, non ero mai stato capace di comprendere la natura del loro moto. Ora vedevo come, spesso, due degli atomi più piccoli si unissero per formare una coppia, come un atomo più grande ne abbracciasse due più piccoli e come, ancora, altri più grandi trattenessero tre o anche quattro dei più piccoli, mentre tutto l'insieme ruotava in una danza vertiginosa. Vedevo come i più grandi formavano una catena, trascinandosi dietro gli atomi più piccoli, ma solo al termine della catena. Vedevo ciò che il nostro vecchio maestro Kopp, mio onorato insegnante ed amico, ha descritto con tanto fascino sul suo *Molekularwelt*; ma io vedevo ciò molto prima di lui. Il grido del fattorino: — Clapham Road! — mi distolse dal sogno, ma passai una parte della notte per buttare sulla carta almeno uno schizzo della forma di questi sogni. Questa fu l'origine della teoria della struttura.

Nel 1856 Kekulè è Privatdozent a Heidelberg ed è qui che giunge ad appurare la tetravalenza degli atomi di carbonio e la loro capacità di legarsi fino a formare delle catene di molti atomi. Egli introduce dei modelli di struttura molecolare anche nelle sue lezioni, aprendo così la via ad una classificazione realmente sensata dei composti organici. Trasferitosi a Gand, Kekulè è poi il vero promotore del Congresso di Karlsruhe del 1860. Dal 1867 è a Bonn dove proprio l'anno seguente viene costruito un nuovo laboratorio di chimica. Qui egli sintetizza nel 1872 il trifenilmetano (base

del colorante rosanilina) e l'antrachinone, il chiarimento della cui struttura molecolare è fondamentale per lo sviluppo dell'industria dei coloranti.

In seguito ai suoi studi sul benzene Kekulè pubblica nel 1865 una memoria (Kekulè [162]) in cui viene espressa per la prima volta l'idea che la molecola di questa sostanza sia costituita da una catena chiusa di sei atomi di carbonio, ciascuno legato con un atomo di idrogeno. La stessa idea viene riproposta in una voluminosa memoria pubblicata l'anno successivo (Kekulè [163]) in cui si affronta anche il problema delle proprietà di simmetria della molecola del benzene. Si tratta in altre parole di appurare se i sei atomi di idrogeno sono tutti equivalenti dal punto di vista del loro legame con il resto della molecola, nel qual caso questa ultima potrebbe essere rappresentata nella forma di un esagono regolare.

A questo proposito Kekulè non manca di rilevare che i dati sperimentali esistenti non consentono ancora di dare una risposta univoca a tale problema (egli discute infatti anche un'altra possibilità) ma assume comunque che la molecola del benzene abbia una simmetria esagonale e mostra come questo possa rendere conto di alcuni fenomeni osservati. Quindi conclude: « Io non dò a queste considerazioni più valore di quanto esse non meritano e credo che occorre fare ancora molto lavoro perché speculazioni del genere possano essere ritenute qualcos'altro che ipotesi più o meno eleganti. Però io credo tuttavia che, almeno in via di tentativo, considerazioni del genere debbano essere introdotte in chimica. Benché noi manchiamo di una efficace comprensione in termini meccanici, tuttavia mi pare che, allo stato attuale della nostra conoscenza, un modo di discutere in termini meccanici possa e debba essere almeno auspicato » [Ivi, p. 177].

Leggiamo comunque alcuni brani dalla prima parte di questa memoria del 1866:

A. KEKULÈ
La struttura dei composti aromatici

La teoria dell'atomicità degli elementi, e specialmente la conoscenza del carbonio come elemento tetratomico [8], ha reso

[8] Oggi si direbbe tetravalente: l'uso della parola 'tetratomico' testimonia della poca chiarezza terminologica che ancora sussisteva.

possibile negli anni recenti, in un modo molto soddisfacente, la spiegazione della costituzione atomistica di gran parte dei composti del carbonio, in particolare quelli che ho chiamato *corpi grassi* [v. App. B]. Finora, per quello che so, nessuno ha tentato di applicare questo punto di vista ai composti aromatici. Quando sviluppai il mio punto di vista sulla natura tetratomica del carbonio sette anni fa, indicai in una nota che mi ero già formato una opinione su questo soggetto, ma non avevo ritenuto opportuno sviluppare l'idea ulteriormente. La maggior parte dei chimici che hanno finora scritto di questioni teoriche non si sono occupati di questo soggetto; alcuni hanno affermato direttamente che la composizione dei composti aromatici non poteva essere spiegata dalla teoria dell'atomicità; altri hanno assunto l'esistenza di un gruppo esatomico formato da sei atomi di carbonio, ma non hanno provato né a trovare il modo di combinazione di questi, né a render conto delle condizioni nelle quali questo gruppo poteva legare sei atomi monoatomici.

Non discuterò qui i motivi che mi hanno finora trattenuto dal rendere pubbliche le mie idee; quello che ora mi spinge alla pubblicazione è la circostanza che negli ultimi tempi molti chimici si sono orientati verso l'investigazione delle sostanze aromatiche. Forse le mie vedute e le conseguenze che ne derivano possono fornire opportuni stimoli per certe ricerche; in ogni caso il lavoro collettivo deve presto mostrare se esse di fatto sono fondate o no ed io non voglio esporre più la scienza, come può essere avvenuto in precedenti pubblicazioni, al pericolo di introdurre in essa un'ipotesi che forse si è guadagnata l'ingresso in virtù della sua forma elegante e che ha potuto mantenersi più a lungo di quanto non meriti per il suo valore intrinseco. [...]

Per rendere conto della composizione atomistica dei composti aromatici è necessario prendere in considerazione i seguenti fatti:

1. Tutti i composti aromatici, anche i più semplici, sono in proporzione più ricchi di carbonio dei composti analoghi della classe dei composti grassi [9].

[9] Il che significa che il numero maggiore delle valenze degli atomi di carbonio devono essere utilizzate per legarli fra loro, anziché con atomi di altri elementi.

2. Tra i composti aromatici, proprio come nei composti grassi, ci sono numerose sostanze omologhe, cioè quelle le cui differenze di composizione possono essere espresse da nCH_2 [10].

3. Il più semplice composto aromatico contiene almeno sei atomi di carbonio.

4. Tutti i prodotti derivati dalle sostanze aromatiche mostrano una certa somiglianza che ne fanno una famiglia; essi appartengono collettivamente al gruppo dei « composti aromatici ». In reazioni che agiscono più energicamente, è vero, una parte di carbonio viene spesso eliminata, ma il prodotto principale contiene almeno sei atomi di carbonio (benzene, chinone, cloranile, acido fenico, acido idrossifenico, acido picrico, ecc.). La decomposizione si ferma con la formazione di questi prodotti se non avviene la completa distruzione del gruppo organico.

Questi fatti ovviamente conducono alla conclusione che in tutte le sostanze aromatiche è contenuto uno e lo stesso gruppo di atomi, o, se vogliamo, un nucleo comune che consiste di sei atomi di carbonio. Entro questo nucleo gli atomi di carbonio sono certamente in stretta combinazione o in una sistemazione più compatta. A questo nucleo, allora, possono aggiungersi più atomi di carbonio e, invero, nello stesso modo e in base alle stesse leggi che nel caso dei corpi grassi.

È poi necessario render conto della costituzione atomica di questo nucleo. Ora, questo può essere fatto molto facilmente con la seguente ipotesi, che, in base al punto di vista ora generalmente accettato che il carbonio è tetravalente, dà una spiegazione in modo così semplice da rendere quasi inutili ulteriori sviluppi. Se molti atomi di carbonio si possono unire con un altro, allora può anche succedere che *una* unità di affinità [valenza] di un atomo leghi *una* unità di affinità di un atomo vicino. Come ho mostrato precedentemente, questo spiega l'omologia e in generale la costituzione dei corpi grassi. Si può ora assumere inoltre che molti atomi di carbonio siano uniti insieme in modo da essere sempre legati attraverso due unità di affinità; si può assumere anche che l'unione avvenga *alternati-*

[10] Nella memoria originale Kekulè usa il simbolo -C per l'atomo di carbonio, secondo una notazione introdotta per risolvere alcune difficoltà derivanti dalle vecchie determinazioni dei pesi atomici.

vamente attraverso prima *una* e poi *due* unità di affinità. Il primo e l'ultimo di questi punti di vista potrebbero venire espressi in qualche modo dai seguenti periodi:

1/1, 1/1, 1/1, 1/1, ecc.
1/1, 2/2, 1/1, 2/2, ecc. [11]

La prima legge di simmetria dell'unione degli atomi di carbonio spiega la costituzione dei corpi grassi, come già menzionato; la seconda conduce alla spiegazione della costituzione delle sostanze aromatiche, o, almeno, del nucleo che è comune a tutte queste sostanze.

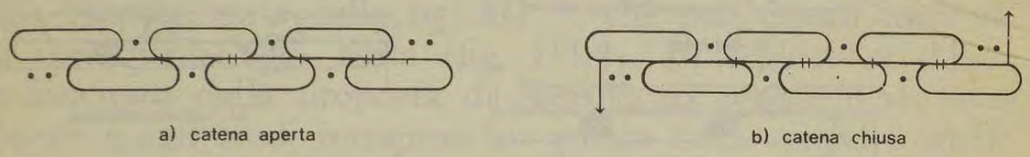


Fig. III.1 - Secondo la notazione di Kekulè gli atomi sono rappresentati con simboli di lunghezza proporzionale alla valenza: in questo caso sono rappresentati gli atomi di carbonio (tetravalenti). I trattini tra gli atomi superiori e quelli inferiori rappresentano i legami mentre i puntini rappresentano le valenze non saturate. Nella catena chiusa gli estremi devono pensarsi legati tra loro.

Se si accetta che *sei* atomi di carbonio si uniscono in base a questa legge di simmetria, si ottiene un gruppo che, se considerato come una *catena aperta*, contiene ancora *otto* unità di affinità non saturate (v. fig. III. 1, a). Se facciamo un'altra assunzione, che i due atomi di carbonio che chiudono la catena siano uniti insieme da una unità di affinità, allora si ottiene una *catena chiusa* (un anello simmetrico) che contiene ancora *sei* unità di affinità libere (v. fig. III. 1, b).
Da questa *catena chiusa* ora seguono tutte le sostanze che si chiamano di solito *composti aromatici*. La *catena aperta* appare nel chinone, nel cloranile e nelle poche sostanze che sono in stretta relazione con entrambi. Non considero qui ulteriormente queste sostanze; esse sono relativamente

11 Ogni coppia di numeri divisi dalla barretta rappresenta il numero di valenze con cui un atomo di carbonio si lega a quello successivo della catena; quindi 2/2 rappresenta C=C, mentre 1/1 indica C—C. Ne segue che i due punti di vista si possono riscrivere come

C—C—C—C—C ecc. e C—C=C—C=C ecc.

Naturalmente Kekulé si occupa qui solo di quelle valenze che legano gli atomi di carbonio tra loro.

facili da spiegare. Si può vedere che essi sono in stretta relazione con le sostanze aromatiche, ma non possono ancora essere realmente considerate con il gruppo delle sostanze aromatiche.
Si può assumere che in tutte le sostanze aromatiche ci sia un nucleo comune; esso è costituito dalla catena chiusa C_6A_6 (dove A indica una affinità non saturata o unità di affinità). Le sei unità di affinità di questo nucleo possono essere saturate da sei elementi monoatomici. Esse possono

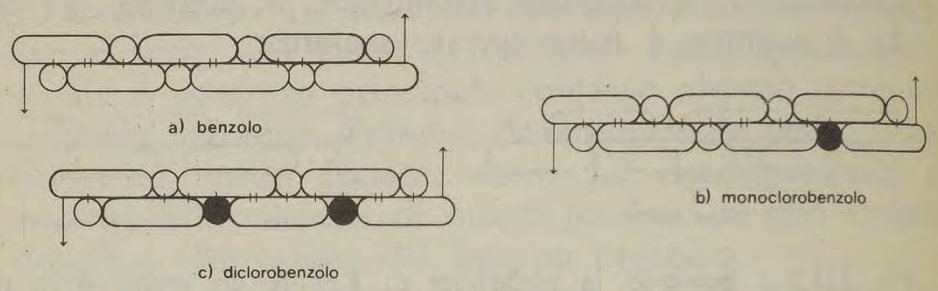


Fig. III.2 - I simboli circolari rappresentano atomi monovalenti; in particolare con il simbolo ○ viene rappresentato l'idrogeno e con ● il cloro.

anche essere tutte, o almeno in parte, saturate da un'affinità di un elemento poliatomico, ma quest'ultimo deve allora essere unito ad altri atomi e così si producono una o più *catene laterali* che si possono ulteriormente allungare legandosi a loro volta con altri elementi. [...]
La costituzione di tutte le sostanze aromatiche si ricava facilmente se si considerano in dettaglio le diverse maniere di saturazione delle sei unità di affinità del nucleo C_6A_6.

1. *Elementi monoatomici.* Quando le sei unità di affinità del nucleo sono saturate con idrogeno si ha il benzolo. In esso l'idrogeno può essere sostituito in tutto o in parte con cloro, bromo o iodio (v. figg. III. 2, a, b, c).
Se si assume per il momento che i sei atomi di idrogeno nel benzolo o i posti nel nucleo C_6A_6, che sono occupati nel benzolo dall'idrogeno, siano equivalenti [12] (un'ipotesi che sarà discussa più in dettaglio in un successo paragrafo), allora, secondo la teoria, è possibile per il monoclorobenzolo e per il pentaclorobenzolo *una sola* modificazione; mentre bi-, tri- e tetraclorobenzolo possono esi-

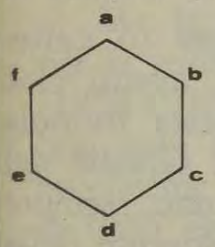
[12] La stessa ipotesi è per semplicità mantenuta in tutte le considerazioni seguenti. [*Nota di Kekulè*]

stere in più (tre) modificazioni isomeriche [13]. [Kekulè (163)]

Come si è già detto, i dati disponibili sui prodotti di sostituzione del benzolo non consentono a Kekulè di fondare su una base certa la sua conclusione circa la struttura esagonale della molecola del benzolo. Questo non toglie però che egli parta da questa ipotesi per svilupparne tutte le conseguenze al fine sia di confermarla sia di allargare comunque il campo di indagine. Nel suo trattato (sempre del 1866) egli rappresenta la catena chiusa dell'anello benzenico nella forma rappresentata dalla fig. III. 3, che può essere confrontata con quella oggi usata (fig. III.4). In seguito al dibattito suscitato dalla proposta di Kekulè, ai problemi da essa sollevati e agli studi intrapresi su questa linea vengono anche proposte altre formule di struttura (fig. III. 5); non ci interessa comunque seguire ulteriormente tali sviluppi, che si prolungano finché la moderna teoria quantistica della risonanza consentirà di dare un significato preciso alle formule di Kekulè [14].

Occorre invece sottolineare che queste ricerche sulla struttura molecolare dei composti organici e in particolare di quelli della serie aromatica sono alla base di quel dirompente svi-

13 Per comprendere il senso di questa affermazione si rappresenti l'anello benzenico nella forma di un esagono regolare con i sei atomi di idrogeno posti ai vertici di esso:



essendo i sei atomi di idrogeno equivalenti, ciascuno di essi può essere sostituito da un atomo di cloro dando luogo sempre al medesimo composto (monoclorobenzolo). Nel caso in cui due atomi di cloro sostituiscano due atomi di idrogeno (biclorobenzolo) si ottengono tre modificazioni isomeriche ponendo rispettivamente gli atomi di cloro nelle posizioni *ab*, *ac*, *ad*. Considerazioni analoghe possono farsi per gli altri prodotti di sostituzione citati. I dati a disposizione di Kekulè non permettevano peraltro alcuna conclusione definitiva in questo senso.

14 Per fare un esempio del tipo di difficoltà incontrate si consideri ancora una volta l'esagono che rappresenta il nucleo benzenico:

secondo tale modello dovrebbero esistere due composti orto-bisostituiti (cioè con due atomi o gruppi atomici sostituenti due atomi di idrogeno adiacenti), ottenuti sostituendo rispettivamente la coppia *ab* e la coppia *af*. In realtà ne esiste solo uno. Per rispondere a questa obiezione Kekulè propone la teoria dell'oscillazione, secondo cui tra gli atomi di carbonio avvengono delle oscillazioni che fanno sì che il doppio legame « oscilli » tra ciascuno di essi e i due adiacenti.

luppo dell'industria chimica tedesca che avremo modo di esaminare in seguito (v. cap. VI). È soprattutto in Germania del resto che queste ricerche vengono stimolate e perseguite con notevole impegno sia nei laboratori universitari che in quelli che cominciano ad essere istituiti presso i nuovi stabilimenti industriali chimici: il chiarimento della struttura delle molecole organiche è non di rado il presupposto per l'individuazione di processi di sintesi realizzabili su scala industriale e ciò lega indissolubilmente il progresso scientifico in questo campo con le fortune della nuova, possente struttura industriale. Vogliamo ricordare a questo proposito un esempio significativo. Nel 1866 E. Erlenmeyer, sulla scia di Kekulè,

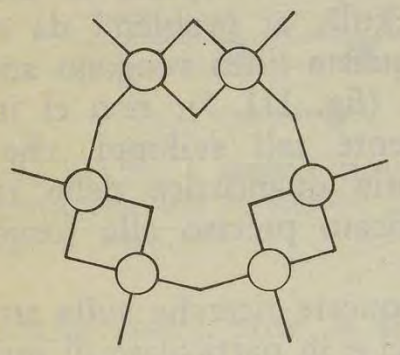


Fig. III.3 - Gli atomi di carbonio tetravalenti (rappresentati dai cerchi) sono congiunti da legami semplici e doppi alternati.

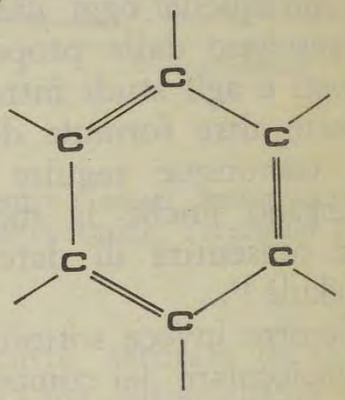


Fig. III.4 - Nel benzolo le sei valenze libere degli atomi di carbonio sono saturate da atomi di idrogeno.

propone una formula di struttura per il naftalene (o naftalina) contenente due anelli benzenici condensati, aventi cioè due atomi di carbonio adiacenti in comune; questa formula sarà poi confermata tra il 1868 e il 1869 da C. Graebe nel corso di quelle stesse ricerche che lo condurranno, sempre nel 1869, alla sintesi dell'alizarina (la sostanza colorante della robbia), la quale segna il decollo dell'industria tedesca dei coloranti (v. § VI.2). Altrettanto significativo è il fatto che tale linea di ricerca venga avversata in Francia, la qual cosa si connette al quadro di relativo ristagno economico-produttivo di questo paese.

Nel 1874 si ha un nuovo importantissimo passo avanti nella strutturistica chimica: per spiegare le proprietà ottiche di certi composti, il fatto, ad es., che il quarzo, lo zucchero in soluzione, ecc., fanno ruotare il piano di polarizzazione della luce polarizzata linearmente che li attraversa, A. Le Bel

(1847-1930) e J. H. Van't Hoff (1851-1911) introducono indipendentemente l'uno dall'altro le formule di struttura in tre dimensioni, fondando così la « chimica nello spazio » (*stereochimica*). Anche in questo caso si registrano delle riserve da parte dei chimici più anziani: in Francia, ancora nel 1878, Dumas scrive a questo riguardo nelle sue *Lezioni di filosofia chimica*: « È con dispiacere che vedo dei giovani chimici, così abili nel fare prezioso uso di tutto il loro tempo, consacrarne, sia pure una piccola parte, a combinare fantasiosamente formule in modo più o meno probabile, più o meno possibile ». Come si vede, l'oggetto della critica è la « fantasia » con cui i chimici della nuova generazione — e in particolare i tedeschi — utilizzano l'ipotesi atomica e i modelli molecolari per guidare la ricerca lungo strade e con metodi ben diversi da quelli codificati nel periodo precedente.

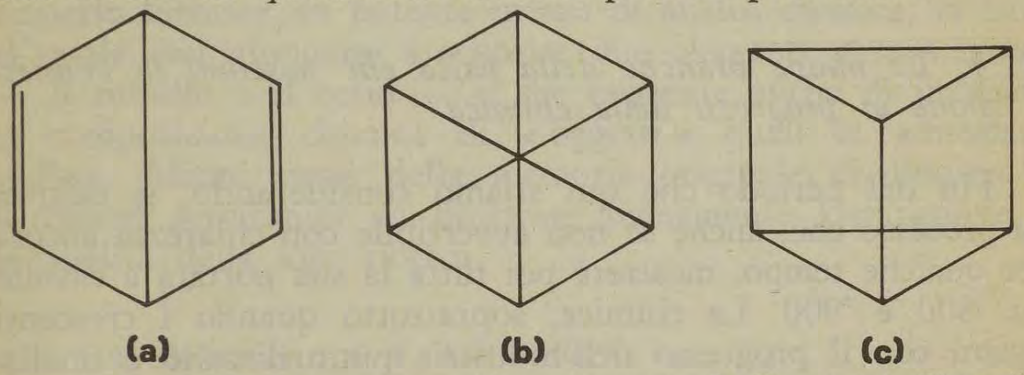


Fig. III.5 - Le formule proposte rispettivamente da Dewar (a), Claus (b), Ladenburg (c) per il benzene.

Me le formule stereochimiche servono anch'esse di guida per la realizzazione di sintesi completamente nuove. E. Fischer (1852-1919), ad esempio, riesce a preparare in laboratorio non solo gli zuccheri naturali, ma anche numerose sostanze zuccherine che non si trovano negli organismi viventi; dopo il 1906 egli avvierà anche lo studio delle sostanze proteiche. Sabatier e Senderens realizzano nel 1897 a Tolosa un metodo generale di idrogenazione, usando nickel come catalizzatore, che sarà utilizzato poi per l'idrogenazione di olii senza grande valore industriale per trasformarli in grassi commestibili, come la margarina, o utilizzabili nell'industria dei saponi e delle candele.

Lo sviluppo vertiginoso della chimica organica su queste basi scientifiche nuove può essere testimoniato dal fatto che nel 1879 il numero dei composti noti è di 74.000 e salirà a 144.000 nel 1910; l'avvio della motorizzazione darà poi

impulso alla nuova branca connessa alla raffinazione del petrolio, ormai nota come *petrolchimica*.

Nell'ambito di questo settore di ricerca matura infine in quegli anni quell'insieme di tematiche connesse al problema dei legami chimici e degli equilibri chimici che costituiranno le basi per la nuova fondamentale branca della *chimica-fisica*, della quale tratteremo diffusamente al cap. VIII perché ci consentirà di rintracciare quei nessi che sono in grado di rendere conto delle grandi svolte della fisica stessa nel passaggio al nuovo secolo. Ma alcuni problemi fondamentali a questo riguardo nascono proprio nel periodo che stiamo esaminando sotto l'impulso diretto dei progressi e delle esigenze del settore chimico, e ad essi vogliamo ora volgerci brevemente.

III.3. *Le nuove branche della fisica che nascono in connessione ai progressi della chimica*

Fin dal periodo che qui stiamo considerando, si delinea un processo che, anche se non avvertibile con chiarezza ancora per qualche tempo, mostrerà poi tutta la sua portata a cavallo tra '800 e '900. La chimica, soprattutto quando i crescenti legami con il progresso dell'industria puntualizzano e finalizzano maggiormente i suoi stessi programmi di ricerca, esprime una serie di metodologie originali, mette a punto una serie di nuove tecniche, fa emergere una serie di problematiche, di vere e proprie branche scientifiche, che risulteranno poi — come vedremo — profondamente innovative, fino a sconvolgere l'assetto delle scienze fisiche. Il processo si delinea ora solo per la nascita di branche nuove, che appaiono per il momento semplici appendici delle discipline principali, ma che, con una maturazione dapprima quasi inavvertibile, pongono i problemi cruciali da risolvere, quelli cioè che soli potranno aprire le vie maestre per uscire dall'*impasse* della fisica a fine '800.

È in questo modo che nasce, per esempio, la *spettroscopia*, una branca che si sviluppa direttamente proprio nel corso del progresso delle metodologie chimiche, in particolare per la necessità, propria della chimica analitica, di ricercare metodi più precisi e sensibili di individuazione delle sostanze e degli elementi chimici ancora sconosciuti. Era noto da tempo che certi elementi chimici impartiscono un colore

caratteristico alla fiamma: per esempio, il cloruro di sodio colora la fiamma di giallo, ed il fenomeno può poi essere messo in relazione direttamente con la presenza del sodio stesso. Non riteniamo necessario fare in questa sede una storia dello sviluppo di queste ricerche. Quello che importa sottolineare è piuttosto il risultato cui giungono nel 1859 R. Bunsen (1811-1899) e G. Kirchhoff (1824-1887) e le considerazioni teoriche cui giunge poi il secondo nello studio dei fenomeni messi in luce.

Per mezzo di uno spettroscopio, strumento che attraverso un prisma scompone la luce nello spettro dei colori che la compongono, i due ricercatori scoprono che ogni elemento chimico, quando sia riscaldato all'incandescenza, presenta uno spettro della luce emessa composto di un certo numero di sottili righe corrispondenti a frequenze caratteristiche. Questa scoperta fornisce un potente mezzo di analisi chimica, in base al quale essi giungono a scoprire due elementi ancora ignoti — il rubidio e il cesio — e che consente anche di indagare la composizione chimica di « oggetti » quali le atmosfere stellari. Alcuni passi della memoria originale di Bunsen e Kirchhoff serviranno ad illustrare pienamente l'ispirazione e la finalità della loro ricerca.

R. BUNSEN e G. R. KIRCHHOFF

Analisi chimica mediante osservazioni spettroscopiche

È ben noto che molte sostanze, quando sono esposte alla fiamma, hanno la proprietà di produrre certe righe brillanti nello spettro. Possiamo fondare su queste righe un metodo di analisi qualitativa che allarga enormemente il campo delle reazioni chimiche e porta alla soluzione di problemi finora irrisolti. Ci limiteremo qui solo all'estensione del metodo alla rivelazione dei metalli degli alcali e delle terre alcaline e all'illustrazione del suo valore in una serie di esempi.

Le righe suddette appaiono più facilmente, quanto più alta è la temperatura e più debole il potere illuminante naturale della fiamma. La lampada a gas descritta da uno di noi [quella che viene ancora oggi chiamata « becco Bunsen »] fornisce una fiamma di temperatura molto alta e luminosità molto bassa; essa è quindi particolarmente adatta alle ricerche su quelle sostanze caratterizzate da righe brillanti. [...]

Da queste ricerche accurate e complete, i cui dettagli possono essere omessi, si deduce che la differenza delle combinazioni in cui i metalli sono usati, la molteplicità dei processi chimici nelle diverse fiamme, e le loro enormi differenze di temperatura *non esercitano alcuna influenza sulla posizione delle righe spettrali corrispondenti ai singoli metalli.* [...] Sembra indubbio quindi che le righe brillanti degli spettri indicati possano essere considerate prove sicure della presenza del metallo in questione. Esse possono servire come reazioni per mezzo delle quali questo materiale può essere rivelato con maggiore certezza, e più velocemente e in quantità più piccole che con qualsiasi altro metodo analitico. [...]
Per coloro che sono divenuti familiari con i singoli spettri mediante osservazioni ripetute non è necessaria una misura accurata delle singole righe; il loro colore, la loro posizione relativa, la loro caratteristica definizione e sfumatura, la gradazione della loro brillantezza, sono criteri del tutto sufficienti per un sicuro riconoscimento anche per gli inesperti. Queste caratteristiche possono essere paragonate con le caratteristiche distintive che i diversi precipitati presentano nel loro aspetto esterno, che noi utilizziamo come test della reazione. Proprio come il carattere di un precipitato determina se esso è gelatinoso, polverulento, flocculento, granulare o cristallino, così anche le righe spettrali indicano le loro caratteristiche nella nettezza dei loro bordi, nell'ombreggiatura uniforme o irregolare su uno od entrambi i lati, nel loro aspetto più largo o più sottile, secondo i casi. E proprio come utilizziamo nell'analisi solo quei precipitati che possono essere prodotti dalla maggiore diluizione possibile, così pure usiamo nell'analisi spettrale per questo scopo solo quelle righe che richiedono per la loro produzione la più piccola quantità della sostanza e solo una temperatura moderatamente alta. In tali caratteristiche quindi i due metodi sono molto simili. Al contrario l'analisi spettrale fornisce, nei fenomeni del colore usati nella reazione, una proprietà che le conferisce un vantaggio senza limiti su ogni altro metodo di analisi. La maggior parte dei precipitati usati per la rivelazione di sostanze sono bianchi e solo pochi sono colorati. Inoltre la tinta di questi ultimi non è molto costante ed è considerevolmente variabile a seconda dello stato più o meno condensato del precipitato. Spesso la più

piccola miscela di sostanze estranee è sufficiente a cancellare completamente un colore caratteristico. Piccole differenze di colore del precipitato non possono quindi essere utilizzate ulteriormente come test chimico. Nell'analisi spettrale, al contrario, le righe colorate rimangono inalterate da siffatte influenze esterne e sono inalterate dalla presenza di altri corpi. Le posizioni che esse hanno nello spettro determinano una caratteristica chimica di natura altrettanto inalterabile e fondamentale del peso atomico della sostanza, e perciò ci consente di determinarla con esattezza quasi astronomica. Ciò che, tuttavia, dà al metodo analitico spettrale un'importanza particolare, è il fatto che essa supera di gran lunga i limiti raggiunti dall'analisi chimica della materia prima d'ora. Essa ci consente di trarre le conclusioni più valide sulla distribuzione e la sistemazione delle sostanze geologiche nella loro formazione. Già le poche ricerche, che questa memoria contiene, conducono alla conclusione inaspettata che non solo il potassio ed il sodio ma anche il litio e lo stronzio devono essere annoverati tra le sostanze terrestri più largamente diffuse, sebbene solo in piccole quantità.

L'analisi spettrale giocherà anche una parte non meno importante nelle scoperte di elementi non ancora rivelati. Giacché se vi sono sostanze che siano così irregolarmente disseminate in natura che i metodi di analisi usati prima d'ora per separarle ed osservarle falliscano, possiamo sperare di rivelare e di determinare molte di esse, mediante il semplice esame dei loro spettri alla fiamma, che sfuggirebbe ai metodi ordinari di analisi chimica. Abbiamo già avuto l'opportunità di mostrare che esistono realmente tali elementi prima d'ora sconosciuti. Pensiamo di essere quindi in grado di dichiarare con assoluta certezza, confortati dai risultati indiscutibili dell'analisi spettrale, che oltre al potassio, al sodio ed al litio, vi è ancora un quarto metallo appartenente al gruppo degli alcali che darà uno spettro altrettanto caratteristico del litio — un metallo che mostra, col nostro apparato spettroscopico, solo due righe, una riga blu debole, che quasi coincide con la riga *Sr* δ dello stronzio ed un'altra riga blu, che giace solo un po' oltre verso l'estremità violetta dello spettro, paragonabile in intensità e nettezza con la riga del litio.

Da un lato l'analisi spettrale offre, come crediamo di aver

già dimostrato, un mezzo di meravigliosa semplicità per rivelare le più leggere tracce di certi elementi nelle sostanze terrestri, e dall'altro essa dischiude alla ricerca chimica un campo completamente chiuso prima d'ora, che si estende ben al di là dei limiti della Terra anche al nostro stesso sistema solare. Giacché, col metodo di analisi che stiamo discutendo, è sufficiente semplicemente vedere il gas in uno stato incandescente per poter fare l'analisi, ne segue subito che lo stesso è applicabile pure all'atmosfera del Sole e delle più brillanti stelle fisse. Occorre qui introdurre una modifica rispetto alla luce che il nucleo di questi corpi celesti irradia. In una memoria *Sulla relazione tra l'emissione e l'assorbimento dei corpi per il calore e la luce* [15], uno di noi ha mostrato, per mezzo di considerazioni teoriche, che lo spettro di un gas incandescente è *invertito*, cioè che le righe brillanti sono trasformate in righe nere quando una sorgente di luce di intensità sufficiente, che dia uno spettro continuo, è posta dietro lo stesso. Da ciò possiamo concludere che lo spettro solare, con le sue righe nere, non è altro che l'inverso dello spettro che l'atmosfera del sole stessa mostrerebbe. Quindi l'analisi chimica dell'atmosfera solare richiede solo l'esame di quelle sostanze le quali, quando siano poste in una fiamma, producono righe brillanti che coincidono con le righe nere dello spettro solare. [Bunsen e Kirchhoff (142)]

Partendo quindi dalla spettroscopia, come metodo nuovo di analisi chimica, l'esigenza che si fa ben presto strada è quella della comprensione coerente di tutti i fenomeni di radiazione (termica e luminosa), sulla base dei princìpi fisici di cui si era riconosciuta la validità dopo gli anni '50 — in particolare il principio di conservazione dell'energia e le leggi della termodinamica — superando i limiti del puro inquadramento dei dati sperimentali e gettando le basi per nuove

[15] È la memoria di Kirchhoff della quale riportiamo dei brani in Appendice. In essa si dimostra che un corpo assorbe selettivamente solo quelle frequenze che è capace di emettere per cui si determina il fenomeno, che qui si discute, dell'inversione dello spettro. Come viene spiegato subito dopo lo spettro solare presenta una serie di righe nere (*spettro di assorbimento*), causate dall'assorbimento da parte degli elementi contenuti nell'atmosfera solare della luce emessa dal nucleo del Sole stesso.

possibili acquisizioni. Kirchhoff imposta così uno studio teorico delle proprietà di emissione e di assorbimento dei corpi arrivando a definire le caratteristiche di un corpo *ideale* le cui proprietà di radiazione sono espresse da una funzione universale, che non dipende cioè dalla sua costituzione. Tale corpo viene detto *corpo nero* (cfr. la nota esplicativa che precede il brano originale di Kirchhoff in Appendice C). Questa problematica, è bene sottolinearlo, nasce direttamente dalle ricerche connesse con gli sviluppi della chimica e, sebbene il suo studio prosegua piuttosto marginalmente rispetto ai temi centrali del dibattito scientifico nel corso dei decenni successivi, la sua assunzione in termini nuovi costituirà la chiave per la svolta fondamentale della fisica nel '900, che analizzeremo in dettaglio al cap. IX.

Un altro esempio di problematiche e tecniche specifiche che si sviluppano nell'ambito della chimica per dare poi luogo a questioni fondamentali e a svolte cruciali nel campo della fisica è offerto dalle tecniche delle *basse temperature*. Una spinta alla refrigerazione era già venuta dall'esigenza di trasportare viveri dalle colonie; successivamente il problema della liquefazione dell'aria diviene fondamentale per la preparazione industriale economica di ossigeno e azoto tramite distillazione frazionata [16]. Attorno a queste tecniche, che si spingono verso temperature sempre più basse, si formano anche strutture di ricerca altamente organizzate e integrate: il laboratorio specializzato in basse temperature di Kamerling-Onnes a Leyda segna infatti un grosso passo in avanti verso la specializzazione e il lavoro d'*équipe*. Il cammino verso le basse temperature condurrà ai primi del '900 a problematiche fisiche quali quella dei calori specifici e del terzo principio della termodinamica, di cui vedremo poi in dettaglio la portata rivoluzionaria. Anche lo sviluppo della *tecnica del vuoto* (che sarà poi fondamentale per la scoperta dell'elettrone e per le misure dei calori specifici a bassa temperatura) è legato alle esigenze dell'industria chimica; mentre vedremo come la tecnica delle alte pressioni si svilupperà nel corso dell'impresa della sintesi industriale dell'indaco. L'*elettrochimica* poi, oltre a costituire un nuovo settore produttivo, sarà anche alla base di ulteriori acquisizioni scientifiche.

16 Il processo consiste nel liquefare l'aria e portarla quindi successivamente alle temperature di ebollizione dei suoi diversi componenti, i quali vengono così « distillati » separatamente.

Gli sviluppi scientifici che abbiamo descritto in questo capitolo e di cui abbiamo voluto cogliere alcuni aspetti di un salto qualitativo già messo in luce per la fisica si collocano anch'essi in un rapporto diretto con quelle trasformazioni delle strutture economiche e sociali che si verificano dopo la metà del secolo. Queste ultime poi, in parte anche come conseguenza del nuovo livello di elaborazione scientifica, conosceranno successivamente, soprattutto in Germania, un profondo rivoluzionamento di cui documenteremo l'influsso profondo sulla stessa elaborazione scientifica. È proprio a causa di questo intreccio tra livelli e metodi dell'elaborazione scientifica e progresso produttivo che tali discipline evolveranno in una direzione e con caratteristiche tali da essere al centro dei mutamenti profondi nella scienza che si verificheranno all'inizio del nuovo secolo.

Appendice A
La teoria atomica

Riportiamo alcuni brani dal *Sunto di un corso di filosofia chimica* di Stanislao Cannizzaro.

S. CANNIZZARO
La distinzione tra atomo e molecola

Io credo che i progressi della scienza, fatti in questi ultimi anni, abbiano confermato l'ipotesi di Avogadro, di Ampère e di Dumas sulla simile costituzione dei corpi allo stato aeriforme, cioè che volumi eguali di essi, sieno semplici, sieno composti, contengono l'egual numero di molecole; non però l'egual numero di atomi, potendo le molecole dei vari corpi o quelle dello stesso corpo nei vari suoi stati, contenere un vario numero di atomi, sia della medesima natura, sia di natura diversa.
Per condurre i miei allievi al medesimo convincimento che io ho, gli ho voluti porre sulla medesima strada per la quale io ci son giunto, cioè per l'esame storico delle teorie chimiche.
Incominciai dunque nella prima lezione a dimostrare come dall'esame delle proprietà fisiche dei corpi aeriformi e della legge di Gay-Lussac, sui rapporti di volume tra i componenti e i composti, scaturì quasi spontanea l'ipotesi sopra ricordata, che fu la prima volta annunziata da Avogadro e poco dopo da Ampère. Analizzando il pensiero di questi due fisici dimostrai che nulla contenea che fosse in contraddizione coi fatti noti,

purché si distinguessero, come essi fecero, le molecole dagli atomi; purché non si scambiassero, i criteri coi quali si comparano il numero ed i pesi delle prime, coi criteri che servono a dedurre i pesi dei secondi; purché infine non si avesse fitto nella mente il pregiudizio che mentre le molecole dei corpi composti possono esser fatte da vario numero di atomi, quelle dei vari corpi semplici dovessero contenere o tutte un atomo, o per lo meno un egual numero di essi.
Nella seconda lezione mi propongo indagare le cagioni per cui questa ipotesi d'Avogadro e d'Ampère non fu immediatamente accettata dalla maggioranza dei chimici; per ciò espongo rapidamente i lavori e le idee di coloro che esaminarono i rapporti tra le quantità dei corpi che reagiscono, senza curarsi dei volumi da essi occupati allo stato aeriforme; e mi fermo ad esporre le idee di Berzelius, per l'influenza delle quali parve ai chimici sconveniente coi fatti l'ipotesi sopra citata. [...]
Stando alla ipotesi sopra citata, i pesi delle molecole sono proporzionali alle densità dei corpi nello stato aeriforme. Volendo che le densità dei vapori esprimano i pesi delle molecole, giova riferirle tutte alla densità di un gas semplice presa per unità, piuttosto che al peso di un miscuglio di due gas, come è l'aria. Essendo l'idrogeno il gas il più leggiero, potrebbe prendersi come unità a cui riferire le densità degli altri corpi aeriformi, le quali in tal caso esprimono i pesi delle molecole comparati al peso della molecola dell'idrogeno fatto = 1. Siccome io preferisco prendere per unità comune ai pesi delle molecole e delle loro frazioni il peso non di una intera, ma di mezza molecola d'idrogeno; così riferisco le densità dei vari corpi aeriformi a quella dell'idrogeno fatta = 2. Avendo le densità riferite nell'aria = 1, basta moltiplicarle per 14,438 per mutarle in quelle riferite a quella dell'idrogeno = 1; e per 28,87 per avere quelle riferite alla densità dell'idrogeno = 2. [Cannizzaro (143)]

Appendice B

La struttura dei composti organici

La *chimica organica* è la chimica di quei composti del carbonio, che riguardano in particolare la materia vivente. Il fatto che i composti del carbonio siano tanto più numerosi di quelli di qualsiasi altro elemento, è dovuto alla particolare capacità degli atomi del carbonio (che hanno 4 valenze) di legarsi direttamente fra loro con legami molto stabili, formando sistemi che possono comprendere anche un numero elevatissimo (fino a molte migliaia) di atomi.

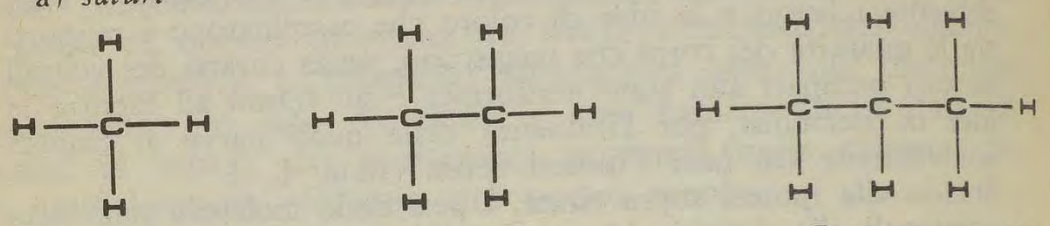
Con l'adozione dei modelli per la struttura molecolare, avvenuta come abbiamo documentato negli ultimi decenni dell'800, la chimica organica compie un salto qualitativo che le consente di

programmare la sintesi di sostanze nuove con le proprietà merceologiche desiderate, soddisfacendo così le esigenze della grande industria chimica, che conosce un impetuoso sviluppo in questo periodo (cfr. cap. VI).

Si distinguono in chimica organica quattro serie di composti:

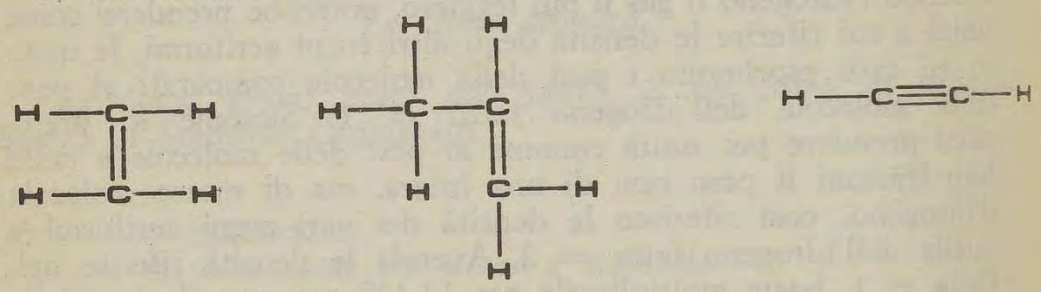
1. *Serie aciclica* (o *grassa*, o *alifatica*) — Comprende quelle sostanze che hanno catene aperte di atomi. I più tipici componenti sono gli *idrocarburi*:

a) *saturi*



Metano Etano Propano , ecc.

b) *non saturi*



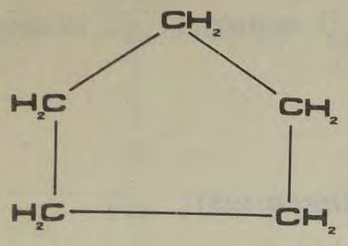
Etilene Propilene , ecc.; Acetilene

Molti idrocarburi non saturi *polimerizzano* facilmente, cioè — mediante la rottura di doppi legami e la formazione di nuovi legami con altre molecole — si legano fra loro direttamente: il caucciù, il polietilene, le gomme sintetiche si ottengono in questo modo.

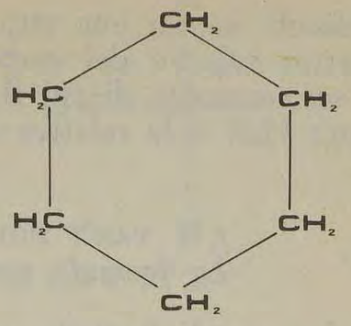
Un processo in certo qual modo inverso è il *cracking* del petrolio, nel quale gli olii pesanti (che erano i componenti maggiormente utilizzati negli ultimi decenni dell'800 come combustibili e lubrificanti) vengono decomposti ad alte temperature in olii leggeri (benzina, gasolina) utilizzati soprattutto con la motorizzazione (il processo di *cracking* viene introdotto negli Usa nel 1913, ma diviene un ordinario processo industriale solo tra il 1926 e il 1936).

A questa serie appartengono anche le *proteine* e gli *zuccheri*.

2. *Serie aliciclica* — Contiene composti con catene *chiuse* di atomi, ma con comportamento chimico e struttura analoghi a quelli dei composti alifatici. Esempi sono:

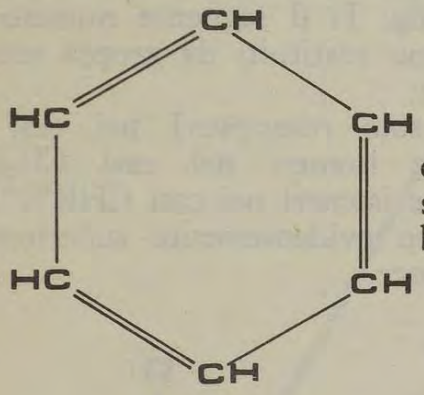


Ciclopentano



Cicloesano

3. *Serie aromatica* — Comprende quei composti nei quali è presente almeno un « anello benzenico »: il composto fondamentale di questa serie è infatti il *benzene*, per il quale Kekulè ha proposto la celebre formula di struttura ad esagono

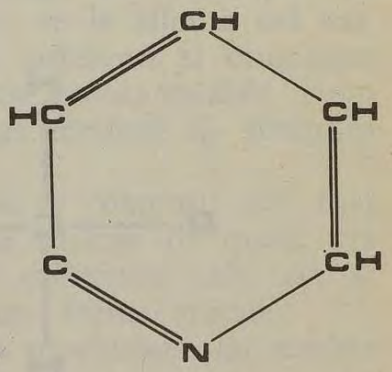


che si indica di solito sinteticamente con il simbolo seguente:

Questi composti hanno una particolare stabilità, dovuta al carattere dei doppi legami tra gli atomi di carbonio all'interno dell'anello.

È a questa serie che appartengono i *coloranti*, dei quali parleremo più diffusamente nel cap. VI.

4. *Serie eterociclica* — I composti di questa serie contengono catene chiuse formate da atomi di carbonio, ma anche da uno o più atomi diversi (eteroatomi). Nella piridina, ad esempio, vi è un solo eteroatomo, l'azoto. Questa struttura è stata proposta da Körner, allievo di Kekulè, il quale l'ha dimostrata direttamente, contro le contestazioni di Riedel, Bamberger e Pechmann.



Piridina

Per spiegare le proprietà ottiche di certe sostanze organiche ed il numero di certi *isomeri* (composti che hanno la stessa formula molecolare, ma proprietà chimiche diverse, riconducibili alla diversa disposizione degli atomi nella molecola) è necessario ipotizzare che le

molecole hanno una struttura in tre dimensioni. In particolare le quattro valenze del carbonio sono dirette verso i quattro vertici di un tetraedro di cui il carbonio occupa il centro (v. il brano di Van't Hoff e la relativa figura nel seguito).

J. H. VAN'T HOFF
Le formule molecolari in tre dimensioni

Le attuali formule molecolari non sono in grado di spiegare certi casi di isomeria; questa incapacità sempre più evidente è dovuta forse all'assenza di nozioni precise circa la posizione relativa degli atomi.
Limitandoci per ora ai composti organici, se si ammette che le quattro affinità [valenze] del carbonio giacciono sullo stesso piano, lungo direzioni perpendicolari l'una all'altra, si ricava per i derivati del metano CH_4 (fig. I) il seguente numero di isomeri [gli atomi di idrogeno sono sostituiti da gruppi monovalenti indicati con R', R'', ecc.]:
Assenza di isomeria [cioè un solo composto] nei casi di CH_3R' e CHR'_3 (fig. II); due isomeri nei casi $CH_2R'_2$, $CH_2R'R''$ e CHR'_2R'' (fig. III); tre isomeri nei casi $CHR'R''R'''$ e $CR'R''R'''R''''$ (fig. IV); numero evidentemente superiore a quello che effettivamente si conosce.

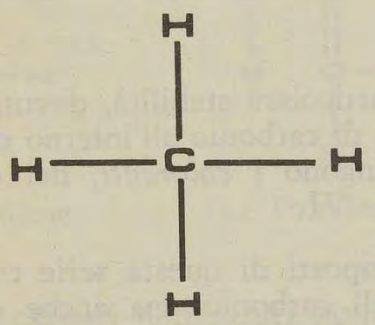


Fig. I - Metano (CH_4).

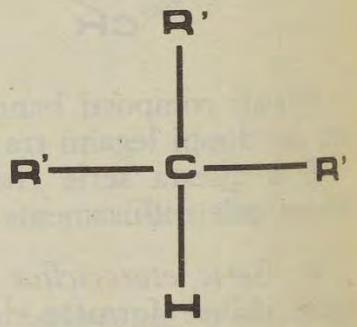
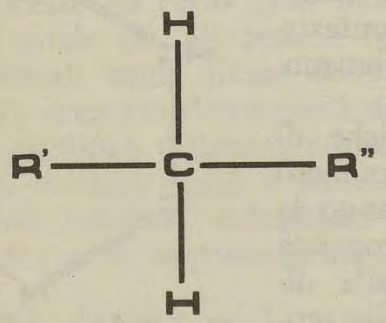


Fig. II - CHR'_3.



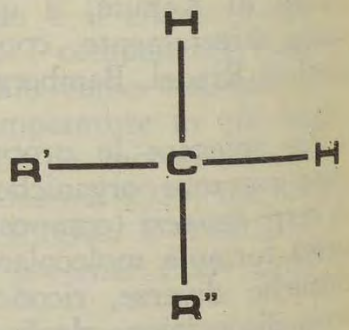


Fig. III - I due isomeri del composto $CH_2R'R''$.

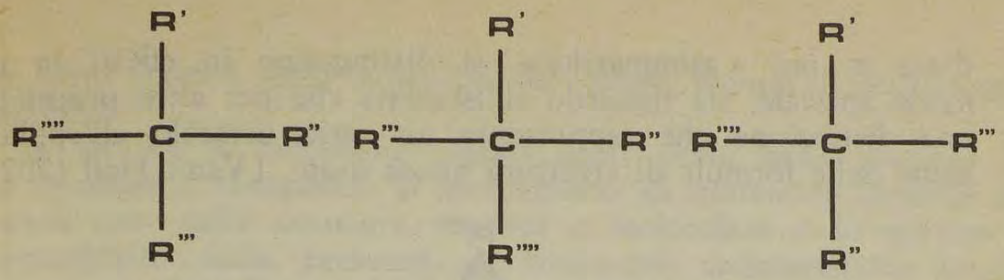


Fig. IV - I tre isomeri del composto CR'R''R'''R''''.

Se si ammette al contrario che le affinità del carbonio sono dirette verso i vertici di un tetraedro regolare, di cui esso occupa il centro (fig. V), si ritrova un marcato accordo tra la teoria e l'esperienza.

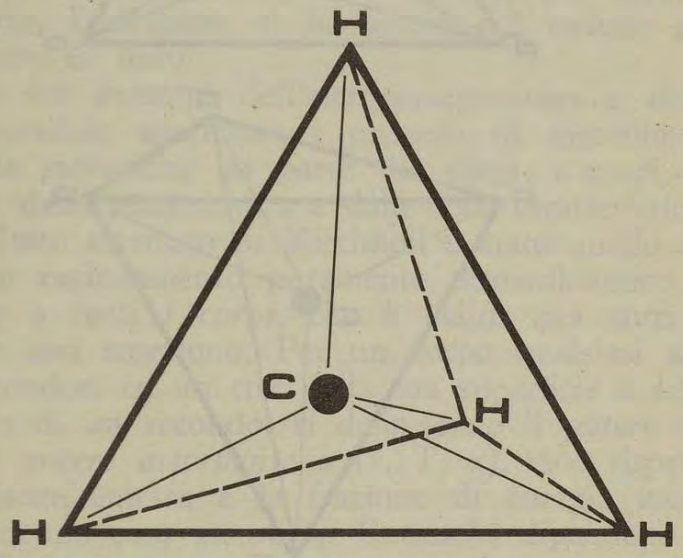


Fig. V - CH_4 nello spazio.

Infatti il numero di isomeri si riduce secondo questa ipotesi a quanto segue: assenza di isomeria nei casi CH_3R', $CH_2R'_2$, $CH_2R'R''$ e CHR'_2R'' mentre solo il caso CHR'R''R''' o più in generale il caso CR'R''R'''R'''' dà luogo alla previsione di una isomeria (fig. VI); in altri termini: se le affinità del carbonio sono saturate da quattro gruppi differenti si ottengono due tetraedri che sono l'immagine *non sovrapponibile* l'uno dell'altro, vale a dire che si hanno due formule di struttura differenti nello spazio.
Di conseguenza, secondo questa ipotesi, i composti del tipo CR'R''R'''R'''' presentano una situazione diversa da quelli del tipo $CR'_2R''R'''$, CR'_3R'' o CR'_4, una differenza che non si ritrova nelle formule molecolari nella loro forma attuale.
Confrontando con la realtà questa prima conclusione mi sembra possibile dimostrare che i composti che contengono un atomo di carbonio legato a quattro gruppi differenti, e che io chiamerò

d'ora in poi « asimmetrici », si distinguono in effetti in un modo speciale, sia riguardo all'isomeria che per altre proprietà; una distinzione che rappresenta un serio ostacolo all'applicazione delle formule di struttura finora usate. [Van't Hoff (202)]

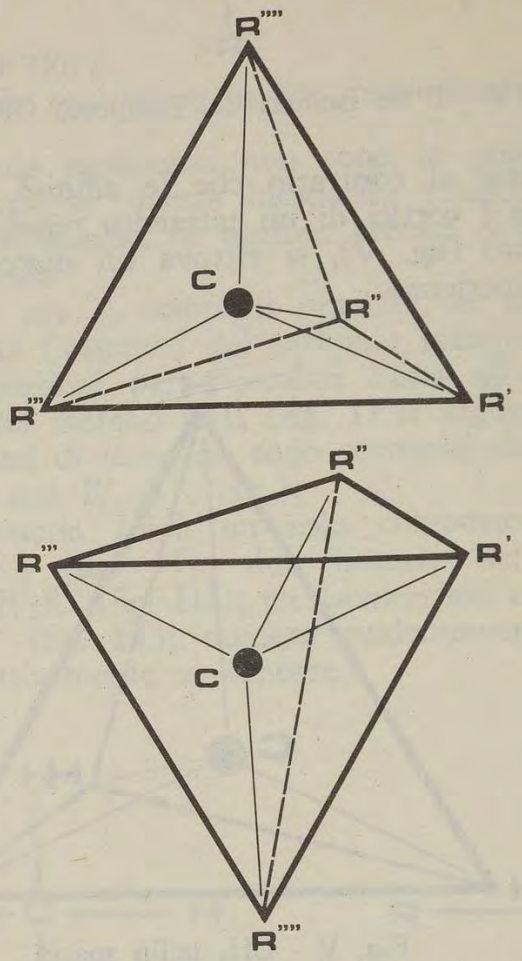


Fig. VI - I due isomeri del composto CR'R''R'''R''''.

Appendice C

Spettroscopia, radiazione termica, corpo nero

Qualunque corpo emette radiazione elettromagnetica per effetto di diversi meccanismi. Essa viene caratterizzata essenzialmente per il suo *spettro di frequenze*, cioè per una funzione che associa ad ogni frequenza presente nella radiazione l'intensità corrispondente[17].

Consideriamo in primo luogo la radiazione che costituisce il *colore* del corpo. Questa si ha solo quando il corpo è colpito da una radiazione luminosa esterna e consiste in quella parte di essa

17 Questa definizione non è del tutto corretta nel caso di uno spettro continuo, ma può essere accettata ugualmente a livello intuitivo.

che viene riflessa dalla superficie del corpo, mentre il resto viene assorbito.

Si ha poi la radiazione emessa dagli atomi della sostanza di cui il corpo è composto. Il meccanismo di emissione dipende in questo caso dalla struttura atomica e molecolare e lo spettro è caratterizzato dalla presenza di frequenze caratteristiche (*righe spettroscopiche*). È proprio l'analisi spettroscopica che fornisce un metodo particolarmente efficace di analisi chimica, anche in corpi non direttamente accessibili come l'atmosfera solare o i corpi stellari.

Infine si ha la *radiazione termica*, la quale è dovuta al moto di agitazione molecolare e dipende fortemente dalla temperatura: lo spettro in questo caso è continuo con frequenze comprese normalmente nella banda dell'infrarosso. Quando il corpo viene riscaldato vengono emesse frequenze via via più elevate finché, all'incandescenza, l'emissione si ha anche nel visibile e il corpo può essere visto al buio.

Sulla base dei principi dell'elettromagnetismo e della termodinamica è possibile analizzare i processi di assorbimento e di emissione della radiazione da parte dei corpi, i quali dipendono essenzialmente dalla temperatura e dalle loro caratteristiche fisiche. Il grande risultato ottenuto da Kirchhoff è stato quello di trovare, in base ad un ragionamento puramente termodinamico, una proprietà *comune a tutti i corpi*, che è valida per tutti i tipi di radiazione che essi emettono. Per un corpo qualsiasi alla temperatura T, riferendosi ad un cm^2 della sua superficie e ad un intervallo di tempo di un secondo, si definiscono il *potere emissivo* e (ν, T, x) e il *potere assorbente* a (ν, T, x), cioè rispettivamente l'energia raggiante emessa e la frazione di energia incidente sul corpo che viene da esso assorbita. Entrambi dipendono dalla frequenza ν e dalla temperatura T e inoltre dalle caratteristiche fisiche del corpo, che abbiamo indicato complessivamente con x. Il *teorema di Kirchhoff* stabilisce che il rapporto tra e ed a è una funzione universale $E(\nu, T)$ che non dipende più dalle caratteristiche fisiche del corpo:

$$\frac{e(\nu, T, x)}{a(\nu, T, x)} = E(\nu, T)$$

Si osservi che la funzione $E(\nu, T)$ può essere considerata come il potere emissivo di un corpo ideale che possieda potere assorbente $a = 1$ per tutte le frequenze, che assorba cioè tutte le radiazioni che incidono su di esso senza rifletterne alcuna. Tale corpo si dice *corpo nero* e la funzione $E(\nu, T)$, che coincide con il suo potere emissivo, si dice *spettro di corpo nero*. In altri termini il corpo nero è un corpo ideale capace di assorbire le radiazioni di tutte le frequenze senza rifletterne alcuna e il cui spettro di emissione dipende soltanto dalla temperatura.

Il teorema di Kirchhoff non è in grado di fornire la forma espli-

cita della funzione E (ν, T) e vedremo in effetti come tale problema non potrà essere risolto nell'ambito delle leggi della fisica classica, per cui Planck proporrà nel 1900 l'ipotesi dei quanti.

Dal punto di vista sperimentale lo spettro di corpo nero può essere determinato purché si costruisca un corpo che si avvicini il più possibile alle caratteristiche « ideali ». Tale problema sarà risolto, come vedremo, al Physikalische-Technische Reichsanstalt di Berlino negli anni a cavallo tra i due secoli.

G. R. KIRCHHOFF
Sulla relazione tra il potere emissivo e assorbente dei corpi per il calore e la luce

La radiazione termica ha la medesima natura della radiazione luminosa; questa costituisce una classe speciale della prima. I raggi termici invisibili si distinguono dai raggi luminosi solo per il periodo di vibrazione o la lunghezza d'onda. Tutti i raggi termici nella loro propagazione seguono le stesse leggi note per i raggi luminosi. Un corpo luminoso nello spazio emette raggi di luce che sono indipendenti dai corpi sui quali cadono; similmente tutti i raggi termici che un corpo emette sono indipendenti dai corpi che lo circondano.

Dei raggi termici che sono inviati ad un corpo da quanto lo circonda, parte sono assorbiti, gli altri sono inviati in direzioni mutate per riflessione e rifrazione. I raggi rifratti e riflessi da esso si propagano insieme a quelli da esso emessi, senza che abbia luogo alcun disturbo reciproco.

Attraverso le radiazioni che un corpo emette, la quantità di calore che esso contiene subisce, secondo la legge, una perdita equivalente alla *vis viva*[18] di quei raggi e, attraverso i raggi termici che esso assorbe, un aumento che è equivalente alla *vis viva* dei raggi assorbiti. Ma in certi casi si può verificare un'eccezione a questa regola, in quanto l'assorbimento e l'irraggiamento producono altri cambiamenti nel corpo, come per esempio in corpi che vengono modificati chimicamente dalla luce, e mezzi che assorbono la luce i quali perdono la loro capacità di scintillare attraverso l'irraggiamento della luce che essi hanno assorbito[19]. Questi casi dovrebbero essere esclusi con l'assunzione che *né per mezzo dei raggi che esso irraggia od assorbe, né per mezzo di altre influenze a cui esso sia esposto, il corpo sia in grado di subire un cambiamento, se la sua temperatura è mantenuta costante fornendogli o sottraendogli calore.* In queste condizioni, per la legge dell'equivalenza tra calore e

18 *Forza viva*: è la grandezza che oggi chiamiamo energia cinetica.
19 Sono i corpi fosforescenti.

lavoro, la quantità di calore che deve essere fornita ad un corpo in un dato tempo per impedirne il raffreddamento, che avverrebbe in conseguenza del suo irraggiamento, è equivalente alla *vis viva* dei raggi emessi; e la quantità di calore che deve essere sottratta per bilanciare il riscaldamento derivante dall'assorbimento di radiazione, è equivalente alla *vis viva* dei raggi assorbiti.

Un corpo che soddisfa queste condizioni sia circondato da una cavità, avente la stessa temperatura, attraverso la quale nessun raggio termico può penetrare, la cui temperatura è mantenuta costante e che soddisfi le medesime condizioni. Il corpo emette raggi termici ed è colpito da quei raggi termici i quali, in parte, provengono dalla cavità, in parte, sono rimandati indietro per riflessione dalla stessa, che ne assorbe una parte. La sua temperatura deve perciò rimanere la stessa, a meno che non gli si tolga o non gli si fornisca calore come segue dal principio da cui deriva la legge di Carnot. Per questa ragione, la *vis viva* dei raggi, che esso emette in un certo tempo, deve essere uguale alla *vis viva* dei raggi che esso assorbe nello stesso tempo.

La dimostrazione che si basa su questa conclusione esige lo studio accurato dei raggi che viaggiano avanti e indietro tra il corpo e la cavità. Questo studio verrà molto semplificato se immaginiamo che la cavità sia composta, interamente o in gran parte, da corpi che, per spessori infinitamente piccoli, assorbano completamente tutti i raggi che cadono su di essi.

Chiamerò tali corpi *perfettamente neri*, o più brevemente *neri*. Un *corpo nero*, in questo senso della parola, deve avere lo stesso indice di rifrazione del mezzo in cui ha luogo l'irraggiamento; non vi sarà allora nessuna riflessione alla sua superficie, e tutti i raggi incidenti saranno totalmente assorbiti [20]. Vapore di iodio denso in contatto con aria, o pece in contatto col vetro, possono essere trattati come corpi neri, approssimativamente, ma non vapori di iodio in contatto con vetro o pece in contatto con aria. Successivamente, studieremo l'irraggiamento nello spazio vuoto; i *corpi neri* cui ci siamo riferiti devono perciò avere un indice di rifrazione che differisce infinitamente poco da 1.

L'assunzione che tali *corpi neri* siano concepibili costituisce un ausilio importante nella dimostrazione che presenteremo. Inoltre, assumeremo che siano concepibili corpi perfettamente diatermani, tali cioè da non assorbire nessuno dei raggi termici incidenti qualunque sia la loro natura, e infine, che sia concepibile uno specchio perfetto, cioè un corpo che riflette comple-

[20] Nel passaggio della radiazione da un mezzo ad un altro con indice di rifrazione diverso si ha sempre infatti una parziale riflessione.

tamente tutti i raggi termici. Uno specchio perfetto, come qualunque corpo diatermano, non può esso stesso emettere nessun raggio; perché se lo facesse (racchiuso in una cavità della stessa temperatura) riscalderebbe sempre più questa cavità e si raffredderebbe sempre più. [...]
Sotto queste condizioni vale la legge seguente: *Il rapporto tra il potere emissivo e assorbente è lo stesso per tutti i corpi alla stessa temperatura.* [Kirchhoff (164)]

Parte seconda

LA SECONDA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

Capitolo quarto

UNA NUOVA FASE DELL'INDUSTRIALIZZAZIONE E L'ASCESA DELLA GERMANIA

Punto di partenza della nostra analisi è stato la collocazione di una precisa svolta nella metodologia scientifica nel contesto del processo di definitiva conquista del potere economico e dell'egemonia culturale da parte degli strati più progressisti delle borghesie nazionali: un processo che, maturato nel vivo delle rivoluzioni quarantottesche, si accompagna ad una generale ripresa dell'attività imprenditoriale e al consolidamento della struttura produttiva capitalistica nei diversi stati europei. La crisi economica del 1873 segna l'avvio di una fase storica nuova, caratterizzata da un lato da una rivoluzione tecnologica destinata a modificare profondamente la produzione e il consumo nei diversi paesi e dall'altro da un radicale mutamento degli equilibri politici e sociali al loro interno e nei rapporti internazionali. Per comprendere l'evoluzione della scienza negli ultimi decenni del secolo scorso e soprattutto per inquadrare nella giusta prospettiva storica la portata della cosiddetta « rivoluzione scientifica » dei primi anni del nostro secolo, è necessario secondo noi individuare correttamente non soltanto il ruolo specifico delle diverse discipline scientifiche in rapporto al nuovo, dirompente sviluppo delle forze produttive, ma anche quelle mediazioni sociali, culturali, ideologiche che realizzando e articolando nel concreto tale ruolo contribuiscono a determinare d'altra parte l'affermazione di una ben definita prassi di produzione scientifica. Vedremo del resto come tale affermazione sia anche lo sbocco di un reale con-

flitto tra differenti alternative, connesse a differenti condizioni strutturali.

IV.1. *L'età dell'imperialismo*

La nuova fase storica si apre, come si è detto, con una profonda crisi economica, la cui dinamica pone le basi per una radicale trasformazione nella struttura economico-produttiva dei diversi paesi capitalistici. Qui, come in occasione delle altre crisi cicliche, il meccanismo di accumulazione capitalistica si inceppa, si restringono i margini di realizzazione del profitto ed emerge drammaticamente la contraddizione tra il livello di produttività raggiunto e la struttura rigida del mercato nell'ambito dei rapporti di produzione esistenti. La caduta del saggio medio di profitto diventa una concreta realtà che impone una trasformazione di tutto il complesso della struttura produttiva al fine di rimettere in moto e dare nuovo slancio al meccanismo di sviluppo capitalistico [1].

La crisi dei primi anni '70 assume però aspetti di maggiore complessità rispetto a quelle del passato. È necessaria infatti una ristrutturazione molto profonda, adeguata ad un livello di rapporti di produzione che alimentano tensioni sociali crescenti: l'esperienza rivoluzionaria della Comune di Parigi ad

[1] Per un'analisi puntuale di tali aspetti cfr. Mattick [33]. In particolare: « La crisi capitalistica convalida la teoria generale dell'accumulazione del capitale, poiché qui l'astratta analisi di valore della produzione capitalistica trova la sua verifica *osservabile*. L'aumento della composizione organica del capitale è uno sviluppo incontestabile. La caduta del saggio del profitto per effetto della crescente composizione organica del capitale, però, si verifica solo in periodi di crisi e di ristagno del capitale, poiché il capitalismo in espansione controbilancia la caduta del saggio del profitto con un aumento della massa dei profitti in rapporto a una massa di capitale più cospicua » [ivi, p. 117].

« Il capitale può accumularsi con una composizione organica del capitale alta o bassa finché il suo saggio di sfruttamento sia corrispondentemente accelerato. L'accumulazione di capitale eccessiva in rapporto allo sfruttamento del lavoro riduce o arresta completamente il saggio di accumulazione; pure le condizioni di crisi che ne conseguono offrono le occasioni per riorganizzare la struttura del capitale complessivo che consente una nuova fase di espansione del capitale. [...] Il capitale meno produttivo scompare per far posto al capitale più produttivo, mentre la concorrenza più accanita tra il capitale rimasto accelera la ricerca di innovazioni che risparmiano lavoro e capitale, finché l'aumento del plusvalore rende ancora una volta possibile l'espansione » [ivi, p. 99].

esempio vede ormai il proletariato industriale porsi coscientemente come antagonista storico della borghesia. La ripresa in effetti tarda a consolidarsi e il *crack* del 1873 è seguito da una lunga fase di instabilità — la cosiddetta « grande depressione » — che vede succedersi fino al 1896 periodi di parziale ripresa e di recessione, il cui andamento peraltro presenta differenze significative tra i diversi paesi. Si chiude la fase di libero scambio che aveva caratterizzato il ventennio precedente e tutti i governi innalzano nuovamente rigide barriere doganali: si sviluppa così l'esigenza sempre più pressante del controllo dei mercati d'oltremare e delle fonti di materie prime e le nazioni europee fanno a gara nella conquista di nuovi territori in Asia e in Africa. Contemporaneamente l'urgenza di uscire dalla crisi e di superare la fase di depressione impone un radicale processo di riconversione produttiva, alla ricerca di più elevati standard di organizzazione e livelli tecnologici. A ciò si accompagna la fine delle imprese più deboli e la concentrazione oligopolistica dei settori industriali di punta, in particolare quelli di nuova formazione, che trasforma rapidamente anche la struttura del mercato e dei consumi. L'esigenza di porre sotto controllo l'instabilità del mercato e del meccanismo di accumulazione induce le imprese più grosse in ogni settore a stabilire larghi accordi per il controllo dei prezzi (*cartelli, konzern, trusts*) al fine di realizzare profitti più elevati e stabili. Il sistema bancario e finanziario subisce anch'esso trasformazioni profonde per rispondere alle nuove esigenze: da un lato la domanda di capitali per il dilatarsi delle imprese industriali con ritmi crescenti di innovazione tecnologica, dall'altro la quota sempre più elevata di investimenti all'estero. Il capitale si dà così forme nuove: nascono società finanziarie per azioni i cui rappresentanti siedono nei consigli di amministrazione delle aziende e il cui potere di controllo si esercita a tutti i livelli della vita economica, politica e sociale. L'ultimo decennio del secolo, che segna l'uscita definitiva dalla crisi e l'avvio di una nuova fase di espansione, vede così stabilizzarsi una struttura produttiva, commerciale, finanziaria radicalmente rinnovata in cui peraltro l'equilibrio tra le varie potenze risulta anch'esso mutato.

L'andamento della crisi e i suoi sbocchi assumono infatti caratteri diversi nei diversi paesi capitalistici. La concreta dialettica tra il livello raggiunto dalle forze produttive e i rapporti sociali di produzione determina sviluppi diversi e per

certi versi contrastanti nelle varie realtà nazionali. Nuovi protagonisti si affacciano sulla scena mondiale e, primi tra questi, la Germania e gli Stati Uniti si troveranno alla fine del secolo a sopravanzare decisamente la Francia e a competere con la tradizionale potenza britannica. La cosiddetta *seconda rivoluzione industriale* manifesta in tali paesi alcune delle sue caratteristiche più significative sulle quali avremo modo di ritornare. D'altra parte un ulteriore aspetto va ancora precisato, relativo al livello di integrazione del mercato internazionale:

> Da allora i mercati mondiali cominciarono ad influire sullo sviluppo economico e industriale dei diversi paesi in misura fino ad allora sconosciuta. I singoli paesi, volenti o nolenti, si vedevano costretti ad adattare le loro industrie e metodi di produzione tradizionali alle conquiste del progresso tecnologico, e a dar vita a nuove industrie, processo che non di rado si accompagnò a gravi ingiustizie sociali. Un'importante conseguenza di questo stato di cose fu che per la prima volta nella storia europea si realizzò una dipendenza delle singole economie nazionali dagli alti e bassi dello sviluppo economico internazionale, che presero ora ad incidere profondamente sulle condizioni economiche dei singoli paesi; la grande fiducia nel progresso prese ad associarsi ad un senso di relativa instabilità e insicurezza economica e sociale. Se specialmente la borghesia si era sentita, finora, relativamente sicura nella compagine sociale più o meno garantita dallo stato, spesso questo atteggiamento fu sostituito ora dal timore di trovarsi, senza una vera e propria protezione, alla mercé delle oscillazioni dell'economia, razionalmente non prevedibili. In tal modo gli enormi progressi economici dell'epoca furono accompagnati da un crescente senso di crisi. [Mommsen (35), p. 53]

Questo « senso di crisi » è — riteniamo — un fattore estremamente importante per comprendere alcuni aspetti dello sviluppo scientifico di quegli anni, marcato anch'esso, come vedremo, da profonde contraddizioni interne. L'integrazione sempre crescente tra questo sviluppo e il processo di ristrutturazione produttiva che caratterizza la nuova fase resta comunque un dato ineliminabile per l'analisi di tali contraddizioni e insieme del salto di qualità che ne rappresenterà lo sbocco in un certo senso necessario.

IV.2. *Le basi del nuovo modo di produzione*

Nel corso del periodo considerato nei capitoli precedenti si erano andate consolidando, sotto la spinta dei nuovi ceti imprenditoriali, le basi scientifiche e tecniche per un salto qualitativo nello sviluppo delle forze produttive; la dinamica connessa alla crisi determina ora le condizioni favorevoli per una domanda massiccia di nuovi ritrovati scientifici e processi tecnologici e quindi per il loro ulteriore sviluppo nel vivo della produzione. Ne deriverà una vera e propria rottura della frontiera tecnologica e dell'assetto produttivo ereditati dalla *prima rivoluzione industriale* e dal modello britannico. La scienza diviene ora un fattore determinante per lo sviluppo del nuovo modo di produzione.

Vediamo rapidamente lungo quali linee principali si articola tale sviluppo [2]. In primo luogo l'introduzione di nuove forme di energia: l'elettricità e successivamente il petrolio. Quest'ultimo però assumerà un ruolo determinante come combustibile e come materia prima alternativa al carbone solo a partire dal primo dopoguerra mentre l'elettricità già alla fine dell'800 è responsabile di una vera e propria rivoluzione nel settore energetico. Si tratta infatti di una forma di energia estremamente versatile per la facilità di trasporto, la « pulizia », le infinite possibilità di impiego su ogni scala. L'invenzione della lampadina a filamento (Edison 1878) crea le basi per l'enorme sviluppo della domanda di illuminazione, mentre il telefono (1876) si affianca al telegrafo nel rivoluzionare il settore delle comunicazioni. In quello dei trasporti si può ricordare la presentazione del primo locomotore elettrico da parte di Siemens all'esposizione universale di Berlino nel 1879. L'elettrometallurgia infine apre nuove prospettive in uno dei tradizionali settori industriali mentre l'elettrochimica offre la possibilità di disporre a basso prezzo di tutta una serie di nuove sostanze quali l'alluminio, il cloro, il sodio. A tutto ciò occorre aggiungere naturalmente le infinite possibilità aperte dall'impiego dell'elettricità come forza motrice per impianti fissi all'interno degli stabilimenti industriali, dove presto scompariranno le tante macchine a vapore che tenevano in movimento torni e telai.

[2] Per una buona esposizione cfr. ad es. il saggio del Landes [32].

Il secondo settore decisivo è quello dell'acciaio che, dopo l'introduzione del processo Bessemer e di quello Siemens-Martin, si avvia a sostituire sempre più il ferro in decine di applicazioni: dai trasporti (ferrovie, navi) alle macchine utensili e agli armamenti. Questa nuova industria siderurgica si sviluppa inoltre all'insegna di un accentuato processo di concentrazione di capitali ed attrezzature. Una svolta decisiva si ha in particolare alla fine degli anni '70 con l'introduzione del metodo Thomas per la preparazione dell'acciaio a partire da minerali fosforici, di cui la Germania è ricca. Le enormi distese di fabbriche della Ruhr daranno presto la misura del vertiginoso sviluppo di tale industria in questo paese, la cui produzione risulterà superiore a quella inglese già nel corso dell'ultimo decennio del secolo.

All'industria chimica, che è senz'altro la più significativa per la nostra analisi, dedicheremo un capitolo successivo, limitandoci qui a ricordare quelle innovazioni che sono alla base del suo rapido sviluppo; in primo luogo il metodo Solvay per la preparazione della soda, che determina una profonda ristrutturazione della chimica pesante; quindi la sintesi dei primi coloranti artificiali per stoffe la quale darà luogo ad un vertiginoso sviluppo della chimica organica, dai farmaceutici ai profumi, dagli alimentari alle prime materie plastiche e così via.

Un quadro sia pure sintetico dei fenomeni che caratterizzano il panorama produttivo maturato nei decenni a cavallo dei due secoli non dovrebbe trascurare gli aspetti relativi alla meccanizzazione e automazione della produzione, cui è legato inoltre un nuovo livello di organizzazione e divisione del lavoro; aspetti che sono del resto strettamente intrecciati alle innovazioni più propriamente tecnologiche. Una tale analisi ci porterebbe però troppo fuori dal nostro tema per cui rimandiamo ai saggi più specifici di storia economica. Su di un aspetto particolare di tale processo, l'organizzazione dei laboratori di ricerca all'interno delle fabbriche chimiche e al ruolo dei tecnici nella gestione delle aziende, torneremo comunque in seguito.

In effetti è proprio il nuovo ruolo produttivo assunto dalla scienza che più di ogni altra cosa caratterizza questa seconda rivoluzione industriale e ne marca la differenza rispetto alla prima. Se consideriamo le nuove industrie, quella elettrica e quella chimica, è facile riconoscere che esse, nascendo e sviluppandosi sulla base delle scoperte scientifiche accumulate nel corso dell'800, fanno della ricerca scientifica un elemento

fondamentale del loro sviluppo: i diversi livelli produttivi raggiunti, così come i prodotti finiti, sono sempre il frutto di una attività scientifica che si svolge *a monte* del processo produttivo stesso e molto spesso ad esso finalizzata. Anche i progressi della metallurgia del resto sono possibili grazie all'apporto di ricerche accurate sulla struttura cristallina dei metalli e delle leghe, il cui risultato è la creazione di particolari leghe d'acciaio per applicazioni specifiche. Si ha cioè un ribaltamento del tradizionale rapporto tra scienza e tecnica che aveva caratterizzato tutta la fase precedente; tale ribaltamento inoltre è proprio di tutti i settori produttivi, sia pure in misura diversa, e investe anche la sfera dei consumi. Nel corso della precedente fase di industrializzazione la scienza e la tecnica si erano mosse su due piani diversi, e se la prima riceveva talvolta dalla seconda stimolo ed ispirazione, questo si traduceva per lo più in una attività di razionalizzazione e matematizzazione di fenomeni e processi la cui utilizzazione sul piano produttivo era dovuta piuttosto all'ingegno e all'esperienza di abili inventori che ad una vera e propria attività scientifica programmata. La termodinamica rappresenta da questo punto di vista un esempio particolarmente significativo. Essa infatti nasce e si sviluppa come disciplina autonoma solo *dopo* che le macchine a vapore si trovano ampiamente inserite nella produzione e quando le prime locomotive inaugurano la nuova èra dei trasporti.

È solo dopo la prima metà dell'800 che un flusso di scoperte scientifiche comincia ad alimentare una serie sempre più ampia di nuove tecnologie fino a condizionare e modificare interi settori produttivi, ovvero a crearne di nuovi. Nasce in questo periodo la vera e propria scienza applicata che, se da un lato costituisce un fattore decisivo per lo sviluppo delle forze produttive, dall'altro non mancherà di condizionare *a monte* la stessa ricerca di base. Questa nuova collocazione *complessiva* della scienza (che del resto è pienamente avvertita a tutti i livelli: si pensi ai romanzi di Jules Verne e al generale atteggiamento di fiducia e di ottimismo nutrito dai contemporanei nei confronti del « progresso ») implica infatti da un lato lo sviluppo di nuove branche e dall'altro il maturare di nuove esigenze di metodo e di autonomia nell'elaborazione scientifica: una scienza che debba divenire trainante dall'innovazione tecnologica deve cioè sapere svincolarsi da metodologie restrittive o comunque limitative e sviluppare tutte le potenzialità capaci di produrre risultati nuovi. Citiamo per esteso un passo del saggio di Landes:

In generale vi fu una graduale istituzionalizzazione del progresso tecnologico. Le imprese industriali più avanzate non si accontentarono più di accettare le innovazioni e di sfruttarle, ma le fecero oggetto di ricerca sperimentale deliberata e programmata. [...] Le tecniche e l'attrezzatura di laboratorio vennero costantemente migliorando e somme crescenti furono destinate alla ricerca. Per chi non era in grado o non se la sentiva di investire capitali a fondo perduto in impianti permanenti e nel relativo personale, cominciarono ad essere disponibili consulenti scientifici e tecnici — una divisione del lavoro che era prova di per sé dell'aumento del mercato del sapere. Un po' alla volta il successo diede origine nell'industria a una vera e propria mistica dei vantaggi della scienza, al punto che le imprese cominciarono a finanziare non soltanto la ricerca applicata ma anche quella di base.
Questo vincolo conoscitivo fra scienza e prassi accelerò enormemente il ritmo delle invenzioni. Non solo l'espansione autonoma delle frontiere della conoscenza diede ogni sorta di frutti pratici non previsti, ma l'industria poté adesso ordinare al laboratorio ciò che desiderava, come il cliente ordina una partita di merci alla fabbrica. L'importanza della tecnologia come fattore di trasformazione economica fu così, in modo singolare, accresciuta e diminuita a un tempo. Da un lato essa divenne più che mai la chiave del successo competitivo e dello sviluppo; più rapido era il ritmo del cambiamento e più importava essere in grado di tenere il passo con i battistrada. Dall'altro la tecnologia non era più una determinante relativamente autonoma; era diventata un ingrediente come gli altri, per giunta con una curva di offerta relativamente elastica. [Landes (32), p. 597]

Le nuove industrie, prime fra tutte quelle chimiche, non soltanto sviluppano al loro interno una ricerca scientifica spesso di avanguardia, ma istituiscono anche proficui rapporti con le università e i laboratori di ricerca pubblici, finanziando ricerche e richiedendo consulenze e collaborazioni. Scienziati e ingegneri acquistano sempre più un ruolo direttivo nella gestione delle aziende le quali, da parte loro, stimolano la costituzione di associazioni scientifiche, la costruzione di nuove scuole e laboratori, la pubblicazione di riviste specializzate.

Tutto questo però, seppure costituisce una caratteristica generale della nuova rivoluzione industriale, assume connota-

zioni diverse a seconda delle condizioni specifiche dei diversi paesi industrializzati. Se è vero infatti che la scienza ha un ruolo determinante nel salto di qualità che alla fine dell'800 si verifica nel livello delle forze produttive è facile riconoscere che le modalità specifiche con cui si realizza l'integrazione scienza-industria dipendono fortemente dal tipo di rapporti sociali di produzione propri dei diversi paesi. La scienza stessa, intesa come insieme di metodi e di contenuti, lungi dall'essere puro presupposto dello sviluppo ne sarà anche un prodotto, assumendo connotazioni tipiche delle situazioni in cui le diverse comunità scientifiche si trovano ad operare. È proprio da questo punto di vista che l'analisi dello sviluppo della scienza tedesca, al cui interno matureranno le nuove rivoluzionarie teorie fisiche ai primi del '900, acquista tutta la sua pregnanza. In Germania infatti, più che in ogni altro paese, si realizzano in modo peculiare tutti i caratteri della nuova epoca, innestandosi su un tessuto sociale e culturale profondamente diverso da quello che cento anni prima aveva fatto da sfondo alla rivoluzione industriale inglese.

IV.3. *L'emergere della potenza industriale tedesca*

Alla vigilia della « grande depressione » la Gran Bretagna è ancora, incontrastata, la maggiore potenza industriale del mondo, con margini di vantaggio tali da far apparire impossibile qualsiasi serio pericolo di concorrenza da parte di altri paesi. Nel volgere dei decenni successivi però due nuove potenze industriali — la Germania e gli Stati Uniti — si troveranno a competere in quasi tutti i settori con l'impero britannico. Le differenze profonde che tuttavia esistono tra esse, e tra queste e l'Inghilterra, sono peraltro estremamente significative per la nostra analisi dello sviluppo della scienza in questo periodo e sono da mettere in relazione con il ruolo di protagonisti assunto in esso proprio dagli scienziati tedeschi.

Prima di affrontare in concreto tale analisi vogliamo però far rilevare l'insufficienza di fondo di una interpretazione dello sviluppo storico in termini di puro sviluppo delle *forze produttive*: in tali termini non sarebbe possibile spiegare ad esempio come la Gran Bretagna abbia potuto essere incalzata e raggiunta dai paesi industriali di nuova formazione. Ben diversa appare al contrario la concreta dinamica di tale sviluppo se si prende atto del fatto che le stesse forze produttive e più

in generale l'intera struttura economica di un paese in un determinato periodo risultano profondamente influenzate dall'insieme dei *rapporti di produzione* all'interno dei quali si sono strutturate e sviluppate; esse portano cioè il marchio indelebile della situazione di classe nella quale si sono plasmate. Si comprende così come l'emergere di nuovi strati sociali di imprenditori più intraprendenti e spregiudicati, in paesi in cui più tardi decolla l'industrializzazione e dove la dinamica sociale risulta nel complesso più varia ed articolata, faccia sì che la solida ossatura produttiva del paese capitalista di più antica formazione risulti incapace di reagire e di svilupparsi con la prontezza e la rapidità necessarie per conservare il vantaggio già accumulato; le economie più giovani al contrario, che non devono fare i conti con una struttura industriale già formata e consolidata, possono svilupparsi sulla base di nuove forze produttive (nel senso più lato della parola, come vedremo in dettaglio), alle quali gli strati sociali più intraprendenti imprimono un dinamismo che non ha riscontro in una struttura più forte ma nello stesso tempo più rigida.

Il decollo industriale degli Stati Uniti si realizza pienamente dopo i cinque anni della guerra di secessione (1860-1865): un conflitto sanguinoso che costa al paese mezzo milione di morti ma che determina da un lato un forte incremento della produzione per sostenere lo sforzo bellico e dall'altro l'affermazione egemonica della borghesia industriale del Nord. Gli Stati Uniti si presentano come un immenso territorio da conquistare e coltivare, con una forza-lavoro d'immigrazione, insufficiente e dequalificata; questo determina un tipo di sviluppo che privilegia la *quantità* della produzione e il perfezionamento delle macchine utensili (cfr. ad es. Habakkuk [78]). Si sviluppa in particolare una tecnica di precisione che permette nel corso della seconda metà del secolo la costruzione in pezzi intercambiabili prima delle macchine da cucire e delle piccole armi, e successivamente anche di macchinari più grandi e complessi. Occorre tener presente infatti che nel corso di tutta la prima fase dell'industrializzazione ogni macchina veniva costruita con i propri pezzi appositamente preparati e non facilmente sostituibili: la nuova tecnica di precisione americana apre in sostanza l'èra della produzione in serie. All'Esposizione mondiale di Filadelfia, nel 1876, i progressi realizzati dagli americani nella produzione di macchine atte a risparmiare lavoro umano destano l'ammirata attenzione degli osservatori europei (cfr. Klemm [59], pp. 332 sgg.). Anche

Max Planck Institute for the History of Science

Preprints since 2014 (a full list can be found at our website)

454 Klaus Geus and Mark Geller (eds.) **Esoteric Knowledge in Antiquity** (TOPOI - Dahlem Seminar for the History of Ancient Sciences Vol. II)

455 Carola Sachse **Grundlagenforschung. Zur Historisierung eines wissenschaftspolitischen Ordnungsprinzips am Beispiel der Max-Planck-Gesellschaft (1945–1970)**

456 David E. Rowe and Robert Schulmann **General Relativity in the Context of Weimar Culture**

457 F. Jamil Ragep **From Tūn to Turun: The Twists and Turns of the Ṭūsī-Couple**

458 Pietro Daniel Omodeo **Efemeridi e critica all'astrologia tra filosofia naturale ed etica: La contesa tra Benedetti e Altavilla nel tardo Rinascimento torinese**

459 Simone Mammola **Il problema della grandezza della terra e dell'acqua negli scritti di Alessandro Piccolomini, Antonio Berga e G. B. Benedetti e la progressiva dissoluzione della cosmologia delle sfere elementari nel secondo '500**

460 Stefano Bordoni **Unexpected Convergence between Science and Philosophy: A debate on determinism in France around 1880**

461 Angelo Baracca ***Subalternity vs. Hegemony* – Cuba's Unique Way of Overcoming Subalternity through the Development of Science**

462 Eric Hounshell & Daniel Midena **"Historicizing Big Data" Conference, MPIWG, October 31 – November 2, 2013** (Report)

463 Dieter Suisky **Emilie Du Châtelet und Leonhard Euler über die Rolle von Hypothesen. Zur nach-Newtonschen Entwicklung der Methodologie**

464 Irina Tupikova **Ptolemy's Circumference of the Earth** (TOPOI - Towards a Historical Epistemology of Space)

465 Irina Tupikova, Matthias Schemmel, Klaus Geus **Travelling along the Silk Road: A new interpretation of Ptolemy's coordinates**

466 Fernando Vidal and Nélia Dias **The Endangerment Sensibility**

467 Carl H. Meyer & Günter Schwarz **The Theory of Nuclear Explosives That Heisenberg Did not Present to the German Military**

468 William G. Boltz and Matthias Schemmel **Theoretical Reflections on Elementary Actions and Instrumental Practices: The Example of the Mohist Canon** (TOPOI - Towards a Historical Epistemology of Space)

469 Dominic Olariu **The Misfortune of Philippus de Lignamine's Herbal or New Research Perspectives in Herbal Illustrations From an Iconological Point of View**

470 Fidel Castro Díaz-Balart **On the Development of Nuclear Physics in Cuba**

471 Manfred D. Laubichler and Jürgen Renn **Extended Evolution**

472 John R. R. Christie **Chemistry through the 'Two Revolutions': Chemical Glasgow and its Chemical Entrepreneurs, 1760-1860**

473 Christoph Lehner, Helge Wendt **Mechanik in der Querelle des Anciens et des Modernes**

474 N. Bulatovic, B. Saquet, M. Schlender, D. Wintergrün, F. Sander **Digital Scrapbook – can we enable interlinked and recursive knowledge equilibrium?**

475 Dirk Wintergrün, Jürgen Renn, Roberto Lalli, Manfred Laubichler, Matteo Valleriani **Netzwerke als Wissensspeicher**

476 Wolfgang Lefèvre **„Das Ende der Naturgeschichte" neu verhandelt**

477 Martin Fechner **Kommunikation von Wissenschaft in der Neuzeit: Vom Labor in die Öffentlichkeit**

478 Alexander Blum, Jürgen Renn, Matthias Schemmel **Experience and Representation in Modern Physics: The Reshaping of Space** (TOPOI - Towards a Historical Epistemology of Space)

479 Carola Sachse **Die Max-Planck-Gesellschaft und die Pugwash Conferences on Science and World Affairs (1955–1984)**

480 Yvonne Fourès-Bruhat **Existence theorem for certain systems of nonlinear partial differential equations**

481 Thomas Morel, Giuditta Parolini, Cesare Pastorino (eds.) **The Making of Useful Knowledge**

482 Wolfgang Gebhardt **Erich Kretschmann. The Life of a Theoretical Physicist in Difficult Times**

483 Elena Serrano **Spreading the Revolution: Guyton's Fumigating Machine in Spain. Politics, Technology, and Material Culture (1796–1808)**

484 Jenny Bangham, Judith Kaplan (eds.) **Invisibility and Labour in the Human Sciences**

485 Dieter Hoffman, Ingo Peschel (eds.) **Man möchte ja zu seinem Fach etwas beitragen**

486 Elisabeth Hsu, Chee Han Lim **Enskilment into the Environment: the *Yijin jing* Worlds of *Jin* and *Qi***

487 Jens Høyrup **Archimedes: Knowledge and Lore from Latin Antiquity to the Outgoing European Renaissance**

488 Jens Høyrup **Otto Neugebauer and the Exploration of Ancient Near Eastern Mathematics**

489 Matteo Valleriani, Yifat-Sara Pearl, Liron Ben Arzi (eds.) **Images Don't Lie(?)**

490 Frank W. Stahnisch (ed.) **Émigré Psychiatrists, Psychologists, and Cognitive Scientists in North America since the Second World War**

491 María Sánchez Colina, Angelo Baracca, Carlos Cabal Mirabal, Arbelio Pentón Madrigal, Jürgen Renn, Helge Wendt (eds.) **Historia de la física en Cuba (siglo XX)**

492 Matthias Schemmel **Everyday Language and Technical Terminology: Reflective Abstractions in the Long-term History of Spatial Terms**

493 Barbara Wolff **„Derartige kolossale Opfer ..." Der Nobelpreis für Physik für das Jahr 1921 – was geschah mit dem Preisgeld?**

494 Thomas Horst **The Reception of Cosmography in Vienna: Georg von Peuerbach, Johannes Regiomontanus, and Sebastian Binderlius**

495 Markus Asper **Science Writing and Its Settings: Some Ancient Greek Modes**

496 Dagmar Schäfer, Zhao Lu, and Michael Lackner (eds.) **Accounting for Uncertainty: Prediction and Planning in Asian History**

497 Joachim Nettelbeck **Verwalten von Wissenschaft, eine Kunst**

498 Carla Rodrigues Almeida **Stellar equilibrium vs. gravitational collapse**

499 Victoria Beyer **How to Generate a Fingerprint**

500 Jens Høyrup **From Hesiod to Saussure, from Hippocrates to Jevons: An Introduction to the History of Scientific Thought between Iran and the Atlantic**

501 Noga Shlomi **The *Tacuinum sanitatis*: Practices of Collecting and Presenting Medical Knowledge Between the Middle Ages and the Renaissance**

502 Jens Høyrup **Reinventing or Borrowing Hot Water? Early Latin and Tuscan algebraic operations with two Unknowns**

503 Maria Rentetzi, Flavio D'Abramo, Roberto Lalli **Diplomacy in the Time of Cholera**

504 Stefano Furlan **John Wheeler Between Cold Matter and Frozen Stars: The Road Towards Black Holes**

505 Ursula Klein **Experten in der Corona-Krise und Geschichte**

506 Pietro Daniel Omodeo, Gerardo Ienna, Massimiliano Badino **Lineamenti di Epistemologia Storica: Correnti e temi**

507 Jens Høyrup **Fifteenth-century Italian Symbolic Algebraic Calculation with Four and Five Unknowns**

508 Angelo Baracca **Scientific Developments Connected with the Second Industrial Revolution: A. Baracca, S. Ruffo, and A. Russo, *Scienza e Industria 1848-1945*, 41 years later**