

Symmetrien und Asymmetrien lassen sich in allen Bereichen der Wirklichkeit entdecken. Die Neugier des Menschen, ihr Wechselspiel zu verstehen, verbindet nicht nur die Wissenschaften untereinander, sondern verknüpft die Wissenschaften auch eng mit den Künsten. Symmetrie und Asymmetrie – das sind zwei Strukturprinzipien, die einerseits von Mathematikern und Philosophen abstrakt definiert werden und die andererseits den empirischen Wissenschaften helfen, eine große Vielfalt von Phänomenen in Natur und Kultur zu erklären. Besonders in der Physik spielen Symmetrien und ihre Verletzungen eine auch erkenntnistheoretisch grundlegende Rolle, was Konsequenzen in der Chemie und Biologie hat. Darüber hinaus erschafft jede Kunstform – von der Musik bis zur Architektur – auf ihre ganz eigene Weise Werke, in denen Symmetrien und Symmetriebrüche von wesentlicher Bedeutung sind. Die Festrede der Bundeskanzlerin Angela MERKEL stellte auch einen Bezug zu Symmetrien und Asymmetrien in unterschiedlichen politischen Zusammenhängen her. Mit dem Thema „Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst“ hat sich in seiner ganzen Breite und großer Tiefe die *Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften* auf ihrer Jahresversammlung 2015 auseinandergesetzt. Vom 18. bis 19. September 2015 behandelten in Halle (Saale) hervorragende Vortragende der unterschiedlichsten Disziplinen natur-, lebens- und verhaltenswissenschaftliche, physikalisch-chemische, medizinische, philosophische und ästhetische Fragen des Wechselspiels von Symmetrie und Asymmetrie. Der schon publizierte Tagungsband (Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412) enthält ausführliche schriftliche Versionen nahezu aller Vorträge, die auf der Jahresversammlung gehalten wurden.

Der Vortrag von Dan SHECHTMAN lag seinerzeit nicht als schriftlicher Beitrag vor und soll nun nach Transkription des mündlichen Vortrages noch separat in schriftlicher Form als Supplement zum schon vorliegenden Band gedruckt werden. Wir möchten Herrn Professor SHECHTMAN unseren Dank für die Erlaubnis zum Druck dieser Fassung des Vortrages aussprechen sowie Frau Dr. KEPPLER für die Mitarbeit bei der Erstellung des Manuskriptes aus der Transkriptionsvorlage und Joachim und Michael KAASCH für die redaktionelle Betreuung.

Der hier nun vorliegende Beitrag beschreibt in einer an den beeindruckenden, lebhaften Vortrag von Dan SHECHTMAN auf der Jahresversammlung eng anknüpfenden Weise eine der bedeutendsten Entdeckungen zur Symmetrie von Kristallstrukturen, die schließlich zum Nobelpreis für Dan SHECHTMAN geführt hat. Es ist eine würdige Ergänzung des Tagungsbandes.

Prof. Dr. Dr. h. c. Martin QUACK
Mitglied des Präsidiums

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Jörg HACKER
Präsident der Deutschen Akademie
der Naturforscher Leopoldina

Preface

Symmetries and asymmetries can be discovered in all areas of reality. Human curiosity attempts to understand these phenomena and to establish connections between the different sciences, relating them to the arts as well. Symmetries and asymmetries are structural concepts which are defined on the one hand in an abstract fashion by mathematicians and philosophers, and which, on the other hand, help the empirical sciences explain a wide range of natural and cultural phenomena. Symmetries and their violations play a particular role in physics, also in its conceptual and epistemological foundation, with consequences for chemistry and biology. In addition, the creations of all the forms of art – from music to architecture – are deeply influenced by symmetries and also by breaking them. The speech of Federal Chancellor Angela MERKEL established relations to symmetries and asymmetries in various political contexts. With the theme ‘Symmetry and Asymmetry in Science and Art,’ the German Academy of Sciences Leopoldina has, at its annual meeting 2015 in Halle (Saale), covered the topic in great depth and breadth. On the 18th and 19th of September in 2015, outstanding speakers from diverse disciplines dealt with questions on the interplay of symmetries and asymmetries in physics, chemistry and the life sciences as well as in behavioural science, medicine, philosophy and the arts. The volume already published (M. QUACK, J. HACKER [Eds.], *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst*, Nova Acta Leopoldina NF Nr. 412, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 2016), 275 pages with contributions in German and English) contains the written versions of almost all of the lectures.

The lecture of Dan SHECHTMAN was at that time not available in written form, and we are happy that it can now be published separately after transcription of the spoken lecture as a supplement to the existing volume. We express our gratitude to Professor SHECHTMAN for the permission to publish his lecture in print, and we also thank Dr. Karen KEPPLER for her help in preparing the final manuscript from the transcription. We also owe thanks to Joachim and Michael KAASCH for technical and editorial support.

The present publication documents the quite exceptional, most impressive and lively lecture of Dan SHECHTMAN at the annual meeting of the Leopoldina in Halle, in a way which closely reflects the oral presentation. It reports on one of the most striking and important dis-

coveries in the crystallography of the twentieth century, on the symmetry of crystal structures and the new field of quasiperiodic crystals, which finally led to the Nobel Prize in Chemistry 2011 being awarded to Dan SHECHTMAN for his discovery of quasicrystals. The printed documentation of his lecture provides an excellent complement to the previously published volume, the contents of which are summarized again at the end (on page 37).

Prof. Dr. Dr. h. c. Martin QUACK
Member of the Presidium

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Jörg HACKER
President of the German Academy
of Sciences Leopoldina

Quasi-Periodic Materials – A Paradigm Shift in Crystallography*

Dan SHECHTMAN (Haifa, Israel /Ames, IA, USA)



Abstract

Crystallography has been one of the mature sciences. Over the years, the modern science of crystallography that started by experimenting with x-ray diffraction from crystals in 1912 has developed a major paradigm – that all crystals are ordered and periodic. Indeed, this was the basis for the definition of “crystal” in textbooks of crystallography and x-ray diffraction. Based upon a vast number of experimental data, constantly improving research tools, and deepening theoretical understanding of the structure of crystalline materials no revolution was anticipated in our understanding the atomic order of solids.

However, such a revolution did happen with the discovery of the icosahedral phase, the first quasi-periodic crystal in 1982, and its announcement in 1984. Quasi-periodic crystals are ordered materials, but their atomic order is quasi-periodic rather than periodic, enabling formation of crystal symmetries, such as icosahedral symmetry, which cannot exist in periodic materials. The discovery created deep cracks in this paradigm, but the acceptance by the crystallographers’ community of the new class of ordered crystals did not happen in one day. In fact it took almost a decade for quasi-periodic crystal order to be accepted by most crystallographers. The official stamp of approval came in the form of a new definition of “Crystal” by the International Union of Crystallography. The paradigm that all crystals are periodic has thus been changed. It is clear now that although most crystals are ordered and periodic, a good number of them are ordered and quasi-periodic.

While believers and nonbelievers were debating, a large volume of experimental and theoretical studies was published, a result of a relentless effort of many groups around the world. Quasi-periodic materials have developed into an exciting interdisciplinary science.

This paper outlines the discovery of quasi-periodic crystals and discusses their structure, as well as the role of transmission electron microscopy (TEM) in this discovery.

Zusammenfassung

Kristallographie ist eine der ausgereiftesten Wissenschaften. Im Laufe der Jahre entwickelte die moderne Wissenschaft der Kristallographie, die 1912 durch Experimente zur Röntgenbeugung an Kristallen begann, das Paradigma, alle Kristalle seien geordnet und periodisch. Diese Überzeugung bildete die Grundlage für die Definition von „Kristall“ in Lehrbüchern der Kristallographie und der Röntgenbeugung. Mit einer Vielzahl experimenteller Daten, fortwährend verbesserter Forschungsinstrumente und der Vertiefung des theoretischen Verständnisses der Struktur des kristallinen Materials wurde keine Revolution in unseren Kenntnissen über die atomare Ordnung von Feststoffen mehr erwartet.

Jedoch fand eine solche Revolution mit der Entdeckung der ikosaedrischen Phase, des ersten quasi-periodischen Kristalls im Jahr 1982 und der Veröffentlichung im Jahr 1984 tatsächlich statt. Quasi-periodische Kristalle sind zwar geordnete Materialien, aber die Atomordnung ist eher quasi-periodisch als periodisch, so dass die Ausbildung von

* Based on the September 19, 2015 lecture of Professor SHECHTMAN at the annual meeting of the Leopoldina.

kristallinen Symmetrien – wie der ikosaedrischen Symmetrie – gestattet ist, die in periodischen Materialien nicht vorkommen können. Die Entdeckung führte zwar zu tiefen Brüchen im herrschenden Paradigma, aber die Anerkennung der neuen Klasse geordneter Kristalle durch die Gemeinschaft der Kristallographen geschah keinesfalls an einem Tag. Tatsächlich dauerte es sogar fast ein Jahrzehnt, bis die meisten Kristallographen die quasi-periodische Kristallordnung anerkannten. Das Gütesiegel offizieller Anerkennung kam schließlich in Form einer neuen Definition von „Kristall“ durch die *International Union of Crystallography*. Das alte Paradigma, dass alle Kristalle eine periodische Ordnung aufweisen, musste verändert werden. Heute ist klar, dass – obwohl die meisten Kristalle geordnet und periodisch sind – dennoch auch eine bedeutende Anzahl geordnet und quasi-periodisch ist.

Während Anhänger und Gegner des neuen Konzeptes diskutierten, wurde eine Vielzahl experimenteller und theoretischer Studien veröffentlicht, die das Ergebnis intensiver Arbeit vieler Forschungsgruppen in der ganzen Welt waren. Quasi-periodische Materialien hatten sich zu einem spannenden interdisziplinären Forschungsfeld entwickelt.

Dieser Beitrag schildert die Entdeckung quasi-periodischer Kristalle, diskutiert ihre Struktur und erläutert die Rolle der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) bei dieser Entdeckung.