

研究生前沿教材书系

Useful Quasicrystals 有用的准晶体

(英文影印版)

Jean-Marie Dubois
(*Ecole des Mines de Nancy, France*)




复旦大学出版社

研究生前沿教材书系

Useful Quasicrystals

有用的准晶体

(英文影印版)

Jean-Marie Dubois

(*Ecole des Mines de Nancy, France*)

Jean-Marie Dubois

1950 年出生于法国 Nancy 市,物理学博士,法国国家科研中心(CNRS)杰出研究导师兼 Jean Lamour 研究所所长。

从 1978 年至 2005 年培养了 20 位博士,并担任下述机构的负责人:

① 复杂金属合金欧洲合作中心(涉及 12 个国家 19 个团体中的 255 位科学家和 80 位博士组成的研究集团)总主持;② Jean Lamour 研究所关于材料-冶金-纳米科学-等离子体-表面科学课题组的基金和建筑规划项目的负责人;③ 准晶体研发的 Brite-Euram 项目的协调人;④ Nancy 材料科学和工程实验室主任;⑤ Nancy 材料工程中心的科学主任;⑥ 法国准晶体和复杂合金重点项目课题组长(涉及法国 30 个实验室的 130 位科学家的研究项目)。

主要著作有:发表学术论文 300 余篇,著作 5 本,14 项专利,内容涉及固体物理、材料科学和应用,准晶态材料和复杂金属合金的应用等。在国际学术会议上报告 100 余次。

主要成就为:适用于金属-准金属玻璃相变原子结构的化学孪晶模型(1980 年至 1982 年);铝-基金属玻璃的发现(1982 年专利);根据中子衍射数据最先建立 Al-Mn 准晶体的结晶模型(1986 年);Al-Cu-Fe 合金中液体-准晶体可逆转变的最先在位研究(1986 年);准晶体潜在应用的头一个专利(1988 年);准晶体低热导率的研究(1991 年专利);最先提出工业规模制造准晶体的设想(1992 年至 1994 年);复杂金属合金中电子态的偏分密度的系统研究(1994 年至今);复杂金属合金的浸润及摩擦特性的实验和理论研究;复杂金属合金低摩擦特性在真空技术和航空技术中的应用(2001 年至今)等。

主要的荣誉有:英国剑桥大学 Churchill 学院会员,法国冶金和材料学会颁发的 Jean Rist 奖,法国国家科研中心授予的铜质奖章,IBM 材料科学奖,大连技术大学终身邀请教授,清华大学海外专家友谊奖,法国物理学会 Yves Rocard 奖,等等。

内 容 简 介

20 世纪 80 年代研究发现,合金的组分金属如果严格按黄金比值配比的话,如 $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{F}_{15}$,那么从液态逐步冷却到固态过程中就会产生稳定的准晶体。准晶体完全不同于严格的金属晶体和玻璃体,它具有自身奇特的性质,因此具有广阔的应用前景。本书就是作者在总结研究前沿的应用成果的基础上写成的。全书共分五章:第一章主要讲述准晶体同晶体和玻璃体的区别;第二、第三章分别介绍准晶体的电子特性和原子迁移本领,热输运和表面特性分别是两章的讲述重点。这两章的主要论点在于阐释准晶体的奇异特性无法用金属理论和合金理论解释的原因。第四章主要介绍准晶体的相形变、样品的制备和规模生产的途径。第五章集中讲述准晶体的现有应用和潜在的应用前景。

序言之后及各章末尾都列出参考文献,为读者希望深入研究提供帮助。全书末尾,作者在“结束语——美梦还未成真”中,概括了准晶体的研究历史和现状,明确了未来的研究方向,对读者具有很好的指导作用。

序 言

——黄金平均值和厨房用品

实验已经持续了一天,每隔三分钟,计算机就能从检测缓冲器中取出一幅全新的衍射图案。窗外落日的余晖十分明亮,暗红色的光芒照着周围美丽的景色。干冷的冬天即将结束。残雪覆盖的山坡,在夕阳的映照下,仿佛犹如闪烁飘落的大瀑布。毫无疑问,格勒诺布尔(Grenoble)的多数市民正在驾着雪橇向家里冲刺。

格勒诺布尔是一座处在法国东南部、离法国境内阿尔卑斯山中心很近的城市。1968年冬季奥运会就在这里举行。在此之前,这里就很迷人,大量登山运动和滑雪爱好者常常光顾,他们很喜欢在山间徒步旅行。行人中不乏在这里工作的科技人员。早在20世纪初期,这里的河道就水坝密集,廉价的电力供应吸引了大批投资客来这里办厂,其中Pechiney铝厂的高大建筑就建在格勒诺布尔,此外,欧洲最大的技术发展中心也设在这里。此后,又相继出现了材料科学、化工工业、核能研究、半导体工业等一系列研发部门和生产单位。同时,这里的格勒诺布尔大学也逐步扩大,现在已是全法国最大的大学之一,学校设备在欧洲属于一流。

一个春光明媚的星期日下午,我们在Laue Langevin研究所(ILL),使用现在还属于同类型中欧洲通量最大的反应堆,从事中子衍射的实验。我之所以被吸引到这里来从事研究工作,决不是因为这里用木板铺成的坡道走起来特别舒服。我的那些同行们的确个个风度翩翩,快步如飞,轻松登顶。到现在为止,我还搞不明白,带着雪橇上下山是不是累赘,不知道这种辅助设备能不能派上各人的用处。带着异样目光对我辈之流的想法不屑一顾的,大多数都是青云直上、地位显赫的垄断寡头。

实验样品是在离这里以北500公里的南锡(Nancy)制备的。

南锡也有一所致力于科学、医药和人文学科的大学,专业设置和规模都与格勒诺布尔大学相当。南锡市的发展得益于附近的煤矿、铁矿的采矿业的发展。一个多世纪以来,钢铁工业是这座法国东北部城市地方经济的支柱。由于过去 30 多年经济的不景气,多数采矿业已经关闭,许多钢铁厂,包括为建造埃菲尔铁塔提供钢材的那家钢厂在内,也纷纷倒闭了。我是在南锡的炼钢炉旁长大的,我还清楚地记得父亲整天在钢铁厂从事繁重劳动的情景。

看到衍射仪屏幕上的图案,我们都十分奇怪,我们关注从液态合金冷却到成为准晶体的全过程。样品就安置在高温炉膛里。鉴于中子具有能够穿透绝大多数材料的长处,我们就能随时逐步观测冷却过程中出现的各种现象。使我们奇怪的是,就像铝和其他金属形成的普通金属化合物那样,从液态合金出发,经过一系列十分平滑的包晶反应,似乎整个冷却过程都没有特别明显的异样发生。一旦包晶反应达到平衡,重新释放出来的热量又会使样品的温度上升。很显然,从液态冷却到固态的相变过程是完全可逆的过程,即使我们只关注相图中很小的一部分也如此。

当实验中发现准晶体的表面吸附能力很低时,这就证明我原先的一些猜想是正确的。这很可能是证明准晶体具有实际用途的最早的、清晰的,当然还是有些难以捉摸的证据。的确,根据这个实验结果有理由相信,用经典的冶金学手段和普通的方法,有可能实现准晶体合金的工业规模的制备。又由于准晶体的唯一结晶学结构,制成完全相同的样品也不困难,相应的专利保护和制作工艺的规范化也比较便利。再加上实用的统一制备方法,至少在一定程度上说明,这种具有奇异特性的新材料,具有相当的市场和广泛的开发潜力。无需再过 10 年,产业界就会认识到它的应用前景,也可能到时会有少量的商品问世。

本书主要阐述准晶体合金已经实现和潜在的可能应用,不过并没有包括我们所知道的全部内容。或许更为重要的是要知道,本书中涉及凝聚态物理的结晶学和电子输运等各个领域。到现在为止,我们对铝的金属化合物已经研究了十多年,研究表明,人们很可能还会发现意外的现象。本书准备描述准晶体用途的深远含义。

关于准晶体,早在 Danny Shechtman 等人于 1982 年的研究发现

之后的短短两年时间,头批重大问题就产生了。当时, Danny Shechtman 及其合作者 I. Blech, J. W. Cahn 和 D. Gratias 在所发表的著名文章中,解释了属于明显长程有序的 Al-Mn 晶体为什么会出现五重对称性的问题。随着此后难以回避的有益的争论,促使我们对固体中原子排布的理解产生了质的飞跃,也就是说,不一定像我们过去所理解的那样,凝聚态物质的序一定要受到平移对称性的限制。这一革新概念又导致一种更加普遍的结晶学的出现,现在看来,这种结晶学理论对于更好地理解由数百甚至数千个原子组成一个晶胞的极为复杂的金属化合物系统的特性是极其有用的。此后,随着 1986 年和 1988 年几篇文章的发表,报道了多种三元合金都能成为稳定的或原则上稳定的准晶体。因此,研究工作又取得了重大的进展。紧接着 An Pang Tsai 之后,我们的中子实验在 Laue Langevin 研究所开始了。An Pang Tsai 指出,在十分接近于组分的百分比为 $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{F}_{15}$ 的极有限的相图范围内,三元合金 Al-Cu-Fe 成为稳定的准晶体了。

开头那段时间,我对准晶体的兴趣并不新颖。那期间我几乎都在同 Christian Janot 一道为了确定原子的位置而采用中子和替代物去调节替代物的散射长度,我们就是以这种方法研究准晶体。不久之后,从我们的测量结果和同行们取得的类似结果中得出 Al-Mn 准晶体的最早的结构模型。从此,我的人生开始了一段十分有意义的富有挑战性的时期。现在回想起来仍然其乐无比。一方面,完全弄懂准晶体结构是一个相当难对付的问题。这也是困扰全世界几个研究小组并且至今仍未完全解决的问题。现在看来我们和其他几个小组已经相当满意地解决了这个问题。我们发现,弄懂这一问题的关键,是根据黄金比值组成多元金属的团簇结构,黄金比值是一个无理数,古代的建筑学家和绘画大师早已注意到了。另一方面,我发现准晶体(或者更确切地说是准结晶形式的团粒)的最初的用途——这是离 Shechtman 的原初发现不到 5 年时间的事——决不是表示“高技术”的产品。它就是一只十分普通的煎锅,这种锅的金属衬底有利于热得更快,表面涂上一层特制的准晶态的合金颗粒,增强表面硬度,提高化学防腐能力,而且还从根本上减小对食物的吸附能力,黄金平均值就这样冲击了我们的厨房用品。

此后不久,我又同我在南锡的同事合作,指出把准晶体用作汽轮机叶片表面的防热层,涂在相互齿轮的零部件上可减小相对运动时的摩擦力,这几种应用更有前途。类似于催化剂、合金的力学强化、阳光的吸收能力等等很多领域的研究工作也在各地展开。这段时间的研究工作主要是对准晶体所显示的奇异特性的了解,包括对相当完美晶格结构的单个团粒特性的了解。电导在这些研究工作中是象征性的。有些准晶体如果同掺杂半导体比较,简直就是绝缘体。这一结果一定与它的弱导热特性密切相关,这同氧化锆的特性有些相似。再则,这种传导特性会随温度上升而增大,如果材料的结晶质量不断提升,电导率反而会随温度上升而下降。总之,这种特性正好同普通合金的行为相反,铝、铜、铁组成的化合物,其特性就十分诱人。至于弹性系数、力学模量、表面能、光吸收本领、晶格动力学等其他特性,本质上讲都与组分金属的相应性质差得很远。为了探究个中原因,对其结构的研究取得重大进步时,我们中的多数研究人员都感到很高兴。

因此,从一开始,至少对于我而言,准晶体简直就是宝贵的金币。当准晶体显示神秘女神迷人的面容时,凝聚态物理学家们就会千方百计地去揭示准晶体结构的神秘面纱,去解读控制准晶体意想不到的特性和机制。金币的另一面则是冒险女神、金融女神、谋略女神和争论女神相互靠在一起的四人头像,尽管她们彼此不想贴近,现实却不让她们分开。她们都是控制准晶体之类新材料技术发展的上帝。新材料总是在知之甚少的地方诞生。现实的情况已经是:不单是科学家,还有许多工程师、技术员、律师、市场开发人员等等都在欧洲金融女神的基金的庇护下方能一道工作,因此这又深刻地丰富了人类的冒险事业。他们又经常要看谋略女神的意愿,有时候,由于意愿的冲突,只能强迫服从取得市场和决定各方利益的最有效方法。当然,正如任何人类的其他事务一样,争论女神也热衷于发挥自身的威力,我必须承认,在游戏中排除争论女神的参与,那是十分麻烦的。

本书并不打算讲述准晶体发展的历史背景。但不可避免地,当谈论何为冒险精神时,正如在这个序言中所做的,正文中仍然会有历史背景的印记,我所知道的最关键发现的有关细节也会在正文中

出现。当然本书的目标是使读者了解我所认为的准晶体的最基本的特征:从结构、成形、稳定性、特性到应用物理展望和准晶态材料的潜在应用等等的描述。假定读者具备固态物理和材料科学的背景知识,但对准晶体却无特别的知识。因此,头一章会告诉你准晶体既不能当作晶体也不是玻璃体,所介绍的准晶态材料的结构多种多样,亦即从真正的非周期性晶体到大晶胞的平移对称性结构都可以为准晶体。为了便于比较起见,通常的晶体合金和金属玻璃的主要特征也作了很好的描述。原子结构的细节问题,因为在许多其他的教科书中已有详细介绍,我们的书中就谈得很少。

紧接着的第二、第三两章,分别讲述准晶体的电子特性和同原子迁移本领有关的性质。热传导和表面特性是特别强调的研究重点。这两章的主要论点在于解释准晶体的奇异特性怎么会与金属或合金理论所预期的特性不同的理由。第三章末尾,根据我们自己和许多其他团体的测量结果提供了许多实例。不管怎么说,由于实例的选取带有作者的个人色彩,介绍的内容也没有完全包括该学科今天用得着的全部知识。在这两章中,我只是根据自己的看法,只讨论那些与准晶体唯一的结构有关的事实和数据。我个人认为,本质上讲都是由实验结果证明是对的、我才认为是正确的模型,但其他专家不一定普遍承认这一点。迄今为止,对我而言,我的指导原则就如刻在我的硬币边缘上的一条线,这条线能把研究工作的两个面都连起来,还能从一面穿到另一面,亦即能把基本原理和应用都在准晶体上象征性地表示出来。

第四章讲述准晶态材料的相形变、制备和规模生产。由此过渡到第五章,讲述准晶态合金的技术应用。这里列举的有限实例都是根据对已有商品的演示性应用结果选取的,这些商品有些已接近于市场批量供应,有些已有专利申请、科学报道或报章摘录的潜在应用前景。不必考虑我在阐述过程中用了各种小标题的事实,大多数的应用都在“节能”这个小标题下给予描述,那是因为就我所知,准晶体的发展都同减小摩擦、减小热损耗、提高太阳能的回收率、提高催化活性等目标有关,但也有不少地方,讲到磁性记录、混合物机械强度加强等其他方面的应用。第五章结束,我们就会看到准晶体科学已经渗透到其他科学领域中了。

本书并不只是为准晶体专家而写的,当然专家们会从中发现大量有用的补充信息。本书更主要的是为工程技术人员、刚进入该领域的新人和学生而写的,他们可从中了解准晶体科学的基础。书中,我尽量不用或少用公式。不过在编写过程中,考虑到完整性,还是无法回避某些技术性很强的章节。如果读者希望了解准晶体更基本的数学和物理学,那么从后面的文献[10]列举的优秀教科书中可以找到很完整的资料。同样,如果读者希望拓宽本书的叙述范围,那么从每一章末尾列举的文献中,读者可以找到答案。显然,这里并没有任何贬低未列入参考文献的那些文章的重要性。

当然,我必须在这最显要的地方,罗列出我要表示敬意的作者们: Danny Shechtman, Ilan Blech, John Cahn 以及我在 CNRS 的同事 Denis Gratias, 是他为我开辟了前进的道路。同样我还要对准晶体的技术发展作出贡献,或者多年来帮助我在实验室中坚持这项研究工作的所有人表达我的敬意,这些人有些来自法国的准晶体研究团体,有的是 CNRS 的领导层,还有分别来自澳大利亚、中国、德国、印度、日本、斯洛文尼亚、瑞士以及美国的专家。在这里我还要专门感谢 An Pang Tsai 邀请我到位于日本筑波的 NIMS 访问,由于那里给我宽松的工作环境,使我有精力完成本书的最后编写工作。Esther Belin-Ferré, Gérard Beck, Christian Janot, Hans-Ude Nissen, 尤其是 Ratnamala Chatterjee 以及 Ulf Dahlborg, 他们善意地审读了书稿,并对全书的不同部分内容提出了评论。当然,本书中遗留下来的错误和不当之处完全应由我本人承担。最后,我乐于对我在南锡的课题组提供财政支持的下述基金会表示感谢: Centre National de la Recherche Scientifique, Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie, Ministère des Affaires Etrangères, Communauté Urbaine du Grand Nancy, Région Lorraine 以及 European Communities.

Jean-Marie Dubois

2003 年 4 月

于南锡和筑波

References

- [1] D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias and J.W. Cahn, *Phys. Rev. Lett.* **53** (1984) 1951.
- [2] A.P. Tsai, A. Inoue and T. Masumoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **26** (1987) 1505.
- [3] J.M. Dubois, C. Janot and J. Pannetier, *Phys. Lett.* **A155-4** (1986) 421; C. Janot, J. Pannetier, J.M. Dubois, M. de Boissieu, *Phys. Rev. Lett.* **62-4** (1989) 450.
- [4] M. Boudard, M. De Boissieu, C. Janot, G. Heger, C. Beeli, H.U. Nissen, H. Vincent, R. Ibberson, M. Audier, J.M. Dubois, *J. Phys. Cond. Matter.* **4** (1992) 10149.
- [5] J.M. Dubois and P. Weinland, *French Patent* n° **8810559** (1988); J.M. Dubois, A. Proner, B. Bucaille, P. Cathonnet, C. Dong, V. Richard, A. Pianelli, Y. Massiani, S. Ait-Yazza, E. Belin-Ferré, *Annales de Chimie* **19** (1994) 3.
- [6] J.M. Dubois and A. Pianelli, *French Patent* n° **9100549** (1991); J.M. Dubois, P. Archambault and B. Colletet, *French Patent* n° **9115866** (1991); J.M. Dubois, *Physica Scripta* **T49A** (1993) 17; J.M. Dubois, S.S. Kang, P. Archambault, B. Colletet, *J. Mat. Res.* **8-1** (1993) 38.
- [7] K. Nosaki, T. Masumoto, A. Inoue and T. Yamaguchi, *Japanese Patent* n° **26559193** (1993).
- [8] A.H. Stigenberg, J.O. Nilsson and Ping Liu, *Swedish Patent* n° **9303280** (1993).
- [9] T. Eisenhammer and M. Lazarov, *German Patent* n° **4425140** (1994).
- [10] *Text books and review papers on quasicrystal science:*
 D. Gratias and L. Michel (Eds.), *Proceedings of the International Workshop on Aperiodic Crystals*, *J. Phys. (France)* **43-C3**, suppl. No. **7** (1986).
 B. Grünbaum and G.C. Sheppard, *Tilings and Patterns* (W.H. Freeman et al., New York, 1987).
 K.H. Kuo (Ed.), *Quasicrystals* (Materials Science Forum, vol. **22-24**. Trans. Tech. Publications, Aedermannsdorf, 1987).
 P.J. Steinhardt and S. Ostlund (Eds.), *The Physics of Quasicrystals* (World Scientific, Singapore, 1987).

T. Janssen, *Aperiodic Crystals: a Contradictio in Terminis?*, *Physics Reports* **168-2** (1988) 55.

M.V. Jaric (Ed.), *Aperiodicity and Order* (Academic Press, New York, Vol. 1, 1988, vol. 2, 1989 and Vol. 3, 1990).

D.R. Nelson and F. Spaepen, *Polytetrahedral Order in Condensed Matter* (Solid State Physics, vol. 42, Academic Press, New York, 1989).

M.V. Jaric and S. Lundqvist (Eds.), *Quasicrystals* (World Scientific, Singapore, 1990).

K.H. Kuo and T. Ninomiya (Eds.), *Quasicrystals* (World Scientific, Singapore, 1990).

J.F. Sadoc, *Geometry in Condensed Matter Physics* (World Scientific, Singapore, 1990).

P.J. Steinhardt and D. DiVincenzo (Eds.), *Quasicrystals: the State of the Art* (Directions in Condensed Matter Physics, Vol. 11, World Scientific, Singapore, 1991).

F. Hippert and D. Gratias (Eds.), *Lectures on Quasicrystals* (Les Editions de Physique, Les Ulis, 1994).

C. Janot, *Quasicrystals: a Primer*, 2nd edition (Oxford Science Publications, Oxford, 1994).

C. Janot and R. Mosseri (Eds.), *Quasicrystals, Proceeding of the 5th International Conference on Quasicrystals* (World Scientific, Singapore, 1995).

M. Senechal, *Quasicrystals and Geometry* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).

M. Duneau and C. Janot, *La Magie des Matériaux* (Odile Jacob, Paris, 1996).

A.I. Goldman, D.J. Sordet, P.A. Thiel and J.M. Dubois (Eds.), *New Horizons in Quasicrystals, Research and Applications* (World Scientific, Singapore, 1997).

M. Quilichini and T. Janssen, *Phonon Excitations in Quasicrystals*, in *Reviews of Modern Physics* **69-1** (1997).

C. Janot and J.M. Dubois, *Les Quasicristaux, Matière à Paradoxes* (EDP Sciences, Les Ulis, 1998).

- S. Takeuchi and T. Fujiwara (Eds.), *Quasicrystals, Proceeding of the 6th International Conference on Quasicrystals* (World Scientific, Singapore, 1998).
- J.M. Dubois, P.A. Thiel, A.P. Tsai and K. Urban (Eds.), *Quasicrystals, Preparation, Properties and Applications* (Proceedings MRS, Vol. **553**, Materials Research Society, Warrendale, 1999).
- Z.M. Stadnik (Ed.), *Physical Properties of Quasicrystals* (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
- E. Belin-Ferré, C. Berger, M. Quiquandon and A. Sadoc (Eds.), *Quasicrystals, Current Topics* (World Scientific, Singapore, 2000).
- F. Gähler, P. Kramer, H.-R. Trebin and K. Urban (Eds.), *Proceedings of the 7th International Conference on Quasicrystals* (Materials Science and Engineering, vol. **294-296**, 2000).
- E. Belin-Ferré, P.A. Thiel, A.P. Tsai and K. Urban (Eds.), *Quasicrystals, Preparation, Properties and Applications* (Proceedings MRS, Vol. **643**, Materials Research Society, Warrendale, 2001).
- U. Mizutani, *Introduction to the Electron Theory of Metals* (Cambridge University Press, Cambridge, 2001).
- J.-B. Suck, M. Schreiber and P. Häussler (Eds.), *Quasicrystals, an Introduction to Structure, Physical Properties, and Applications* (Springer-Verlag, Berlin, 2002).
- A. Yamamoto and A.P. Tsai, *Proceedings from the Quasicrystals 2001 Conference, Sendai, Japan*, in J. Alloys and Compounds, vol. 342, Eds K.H.J. Buschow, H. Uchida and G.J. Miller (Elsevier, Amsterdam, 2002).
- H.-R. Trebin (Ed.), *Quasicrystals* (Wiley, Weinheim, 2003).
- S. Ranganathan, K. F. Kelton and K. Chattopadhyay (Eds.), *Proceedings of the 7th International Conference on Quasicrystals* (J. Non-Crystalline Solids, vol. **334&335**, 2004).
- E. Belin-Ferré, M. Feuerbacher, Y. Ishii and D.J. Srodelet (Eds.), *Quasicrystals, Preparation, Properties and Applications* (Proceedings MRS, Vol. **805**, Materials Research Society, Warrendale, 2004).
- P.A. Thiel (Ed.), *Progress in Surface Science, Special Issue Quasicrystals* **75** 3-8 (2004).

TABLE of CONTENTS

Foreword	The Golden Mean and the Kitchen	vii
General References		xiii
Chapter 1	What to Know to Start with	1
1	Introduction	1
2	Classical and Non-Classical Crystals	5
3	The Reciprocal Space	17
4	The Search for Enhanced Mechanical Properties	23
5	The Birth of a Monster	30
6	The Quarrel of Ancients and Moderns	35
7	The World of Quasicrystals	41
8	Recovering the Periodicity	49
9	Organised Disorder : the Phasons	55
10	From Tilings to Coverings	59
References		63
Chapter 2	Strange Physical Properties	69
1	Introduction	69
2	Basics of Metal Physics, in Very Simple Words	70
2.1	Electron Transport in Metallic Crystals	70
2.2	Electron Bands	73
2.3	The Hume-Rothery Rules in Crystals	79
3	Electronic Transport in Quasicrystals	83
3.1	Phenomenological Data	83
3.2	An Insulator Made of Metals	91
3.3	Quantum Interference Effects	94
3.4	Variable Range Hopping	95
3.5	Hierarchical Recurrent Localization	98
3.6	Optical Properties	108
3.7	Another Step Towards a Model of Electronic Conductivity	110
4	Electron Densities of States	115
4.1	Pseudogap and Relevant Experimental Information	116
4.2	The Hume-Rothery Gap in Related Crystals	125
4.3	Surface Electronic States	128

4.4	A Bit More about d-states and the Role of Transition Metals	130
4.5	Enhanced Stability of Quasicrystals and Approximants	133
5	Lattice Dynamics and Thermal Conductivity	137
5.1	Lattice Vibrations in Icosahedral Mono-Domain Samples	139
5.2	Heat Conduction	142
5.3	Structural Scattering of Phonons	146
5.4	Electronic Contribution to Heat Transport	152
6	Magnetism	154
	References	159
Chapter 3	When Atoms Move Away	167
1	Introduction	167
2	Brittle Intermetallics that End into Chewing-Gum	169
2.1	Hardness, Brittleness and Low Friction	171
2.2	Plastic Behaviour at Elevated Temperature	184
2.3	The Role of Dislocations	187
2.4	Behind Dislocations, Cluster Friction	193
3	Non-Conventional Surfaces	198
3.1	Rough and Flat Surfaces	198
3.2	Static Friction on Clean Surfaces	207
4	Oxidation Behaviour	209
4.1	Dependence on Oxidizing Environment	209
4.2	Kinetics and Temperature Dependence	213
5	Atomic Mobility	216
5.1	Atomic Transport in Normal Crystals	216
5.2	Diffusion in Icosahedral Quasicrystals	219
5.3	Phason Assisted Diffusion	227
5.4	Atomic Jumps	234
	References	238
Chapter 4	Preparation and Mass Production	245
1	Introduction	245
2	Phase Selection	247
3	The Multitude of Approximants	251
3.1	Crystals and Approximants in the Al-Cu-Fe-Cr System	252
3.2	B2-Based Approximants in Relation to Quasicrystals	254
4	Phase Diagrams	258
4.1	Growth from the Liquid State	259

4.2	Equilibrium Phase-Diagram Data	260
5	Phase Transformations	264
5.1	Order-Disorder Transitions	267
5.2	Phason-Driven Transitions	271
5.3	Pressure-Induced Transitions	275
5.4	Surface Transformations	281
6	Preparation in the Laboratory	285
6.1	Out-of-Equilibrium Methods	286
6.2	Mono-Domain Samples	293
6.3	The Nightmare of Growing a Stable Quasicrystal	298
6.4	Sintering	302
7	The Thick Coatings Route	305
7.1	Thermal Spraying versus Magnetron Sputtering Techniques	305
7.2	Processing of Atomized Powders	316
7.3	Polishing and Surface Preparation	324
7.4	Phase Stability of Quasicrystalline Coatings in Aggressive Media	328
8	Thin Films and Nanosized Precipitates	336
8.1	Multilayers or Vapour Deposited Films	337
8.2	New Data from Kinetics of Growth	342
8.3	Nanosized Precipitates in Selected Metallic Alloys	346
	References	349
Chapter 5	The Rise of a Dream	361
1	Introduction	361
2	Smart Surfaces	362
2.1	Facts and Artifacts	362
2.2	Wetting and Electronic Properties	372
2.3	Cooking Utensils for the Future	383
3	Application to Energy Savings	386
3.1	Thermal Barriers	386
3.2	Reducing Friction and Wear	393
3.3	Friction in Vacuum and (Once More) Surface Energy	402
4	Electronic Devices	413
4.1	Light Absorption and Sensors	413
4.2	Thermo-Power Generation	416
5	Generation of a Green Energy	420
5.1	Catalysis	421
5.2	Hydrogen Storage	424

6	High-Performance Alloys for Mechanical Applications	431
6.1	New Maraging Steels and Light Alloys	431
6.2	Metal and Polymer Matrix Composites	438
7	Perspective View at Other Applications	442
References		448
Conclusion	The Dream is Not Over Yet	459
References		471
Index		475