



## 准晶体, 而非准科学家

Dan Shechtman\*

以色列理工学院, 材料科学与工程系 (以色列, 海法)

### 少年审稿人

8TH GRADE  
"NACHSHON"  
CLASS.  
"MAKIF  
AMIT  
SCHOOL,  
ISRAEL"



年龄: 12-13

材料科学主要研究不同材料的结构和特性。有一种材料叫晶体。晶体是固体材料, 其基本构造单元 (原子、离子或分子) 在空间以高度有序的方式组织在一起。盐、石英和钻石都是著名的晶体。在普通晶体中, 基本构造单元按照一定周期性组织起来, 它们在各个方向上是周期性重复的。但在特殊晶体即准晶体 (或准周期性晶体) 中, 基本构造单元的排列是非重复的。准晶体的发现掀起了晶体科学的一场革命, 改写了我们对晶体的基本定义。在发现了第一个准晶体后, 科学家们又发现了几百种准晶体。有的准晶体显示出独特的物理特性, 已经在许多领域得到应用。

达尼埃尔·谢赫特曼教授因发现准晶体, 于2011年而获得诺贝尔化学奖。

### 我是如何成为材料科学家的

我七岁时, 祖父送给我一份特殊的礼物——放大镜! 我很开心, 拿着放大镜在拉马特甘到处走。我用它观察身边的一切: 花朵, 虫子, 沙子, 还有许多其它微小的东西。在这个过程中, 我不知不觉爱上了微观世界。

### 透射电子显微镜 (Transmission electron microscope)

一种使用电子束渗透正在研究的材料的显微镜。电子会产生衍射图案, 呈现材料的原子结构。

### 合金 (Alloy)

由至少两种元素 (其中至少一种是金属) 构成的材料。

### 相 (晶体) (Phase (crystal))

材料的某种状态。很多时候我们谈论相, 是指材料的状态——气体、液体、固体或等离子体, 但是这里我们的意思是, 构成材料的原子的独特空间排列。

### 晶体 (Crystal)

一种固体材料, 它的组成部分 (原子, 离子, 分子) 在空间上有序地排列。

### 衍射 (Diffraction)

光或电子在遇见障碍物 (如晶体或其他固体材料) 时散开的现象。

### 准晶体 (Quasi-crystal)

准晶体的组成部分按照非周期性的方式排列, 这意味着它们在各个方向上的排列不具有重复性。

### 晶体学 (Crystallography)

一个学科, 研究固体中原子的空间排列的, 晶体就在其中。

#### 图 1

第一个准晶体的发现。(左) 1982 年我发现的铝锰准合金的衍射图案。黑点表示原子的分布排列情况。(右) 我的实验室笔记, 记录下了发现这个特殊结构时的惊讶心情 (图片由作者提供)。

后来我五年级时, 学校新到了一台显微镜。每周我都请求老师把显微镜带到课堂来。终于有一天他真的带过来了, 还让我第一个上去观察。我们观察了一片树叶, 我还能看到叶绿素在动。从那以后我再也离不开那台显微镜了。

又过了很多年, 我到以色列理工学院念书的时候, 我们系获得了一架特别强大的显微镜, 叫透射电子显微镜 (transmission electron microscope, 简称 TEM)。我爱上了 TEM, 因为它能实现我对微观世界的科学好奇心。很快我就掌握了 TEM 的操作要领, 正是用它, 我发现了后来给我带来诺贝尔奖的一种新材料。

### 准晶体的发现

1981 年, 我到美国学习与飞机有关的铝合金材料。我先是研究铝铁合金, 发现了一种新的相——即合金原子新的排列顺序。我想研究这个排列顺序, 但它并不稳定, 经常变化。所以我又制作了各种铝锰合金, 因为铝锰合金比较稳定。

做合金时我用了不同浓度的铝和锰, 虽然有些并不适用于飞机材料, 出于好奇我还是把它们都制备出来了。然后再用 TEM 逐一研究。我管 TEM 叫“显微镜之王”, 因为它是一种强大的研究工具, 具有惊人的能力, 可以让我们看到材料中原子的排列方式。

1982 年 4 月 8 日星期四, 当我用 TEM 扫描一种合金时, 屏幕上出现了非常特别的图案。我们把电子和固体障碍物 (如晶体) 相互作用时产生的图案叫衍射图案。我立刻意识到这种合金的衍射图案不同寻常。也就是说这种材料具有特殊的内部结构, 即现在所说的准晶体结构。

我当即在实验室笔记本上 (图 1 右) 写下“10 阶???” 现在我来解释一下为什么这个图案如此特殊, 我的笔记是什么意思, 以及为什么这个发现给晶体学带来了一场革命。

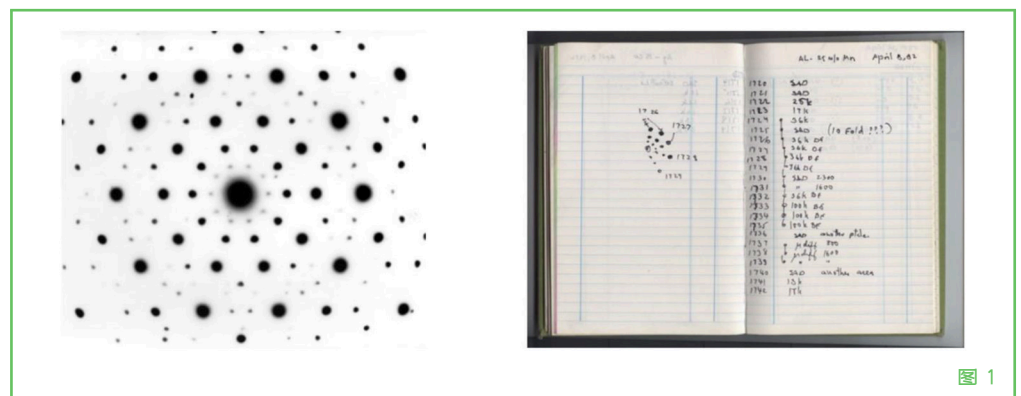


图 1

### 有序 (Order)

并非随机的, 有组织的图案。

### 周期性 (Periodically)

(在时间或空间上) 反复复制的重复的图案。

### 图 2

顺序、周期性与旋转对称。(左) 一个简单、有序、周期性的晶体。圆点代表晶体内的原子, 它们呈有规律而非随机的分布。晶体是周期性的, 如果选择任意一条红线, 从一端到另一端时相邻原子之间的距离是相等的。还可以选择任意四个原子组成的正方形, 并对其进行复制而获得晶体结构, 这也是周期性的表现。(中) 一个 4 阶旋转对称的晶体结构。想象你抓着那个红色的把手, 把它按顺时针方向旋转 90 度。(右) 现在把手在右边。不看把手的话, 整个结构在旋转前后没有任何改变。这个晶体的结构每转 90 度就重复一次。这叫 4 阶旋转对称, 因为旋转 4 次就完成了整个一圈的旋转, 所有圆点都回到原来位置 (图片由作者提供)。

### 旋转对称 (Rotational symmetry)

通过围绕中心轴旋转来进行自我复制的图案。

## 准晶体发现之前和之后的晶体学

1912 年, 德国科学家马克斯·冯·劳厄开创了晶体学。冯·劳厄是第一个把 X 射线打到晶体里的人, 他看到了晶体原子形成的有序衍射图案。同年, 英格兰一对名叫布拉格的父子科学家发明了一个数学方程式, 用来描述冯·劳厄观察到的实验现象。从此晶体学开始崭露头角。

晶体学诞生后, 科学家们研究了数千种晶体, 它们表现出两方面的共性: 原子排列是有序的 (非随机) 和周期性的 (表现出重复模式) (图 2)。在这些观察的基础上, 晶体被定义为“内部原子具有固定、重复结构的固体材料”。

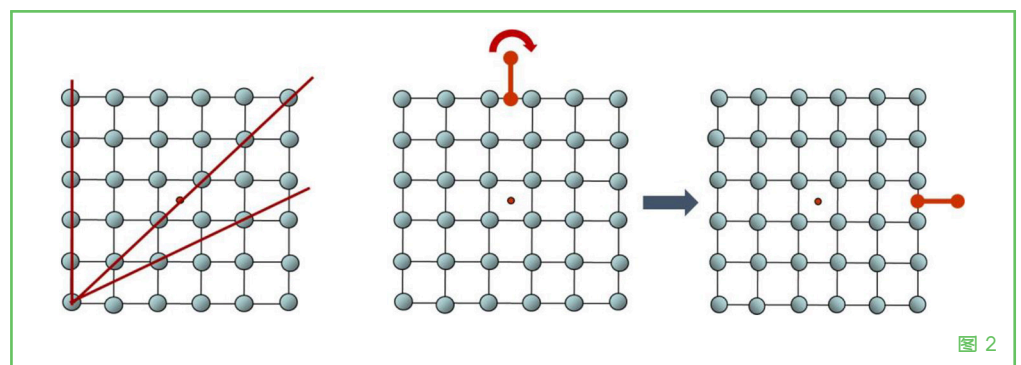


图 2

盐粒、石英砂和钻石都是典型的晶体, 而大多数金属 (如铜、铝、铁) 也是晶体。传统晶体还具有旋转对称的性质。描述晶体结构的数学法则表明, 晶体可以具有不同的旋转对称性, 称为“阶”, 包括 1 阶, 2 阶, 3 阶, 4 阶或 6 阶 (图 2 展示的是 4 阶旋转对称结构), 而非其它的阶数 (如 5 阶或 10 阶)。

晶体学诞生整整 70 年后, 我发现了一种有序、但非周期性的晶体。为了更好地理解这句话的意思, 请看图 3 的左边。你可以看到, 在中心圆点的周围有若干逐渐向外扩展的、由黑点组成的同心圆 (从内到外颜色分别为蓝、黄、红)。

每个圆上都有十个点, 就像一朵由五对叶子组成的小花 (点 1 对点 6, 点 2 对点 7, 等等)。量一下圆心到第一个圆的距离, 你会发现它并不是圆心到第二个圆的距离的一半 (如图 3 右侧的蓝线和黄线所示)。圆心到第一个圆的距离也不是圆心到第三个圆的距离的三分之一 (图 3 右侧蓝线和红线所示)。

这说明我们不能对其中的一个圆进行复制, 然后按相同的间隔距离依次排开来得到这个晶体的实际结构。所以这个晶体是非周期性的。不过, 我们确实可以用数学来描述圆心到各个圆周的半径, 这说明该晶体

图 3

准晶体的衍射图案。(左)衍射图案中逐渐扩展开来的同心圆(蓝、黄、红),每个圆上有 10 个点,以圆心为中心两两对称(如点 1 对点 6)。(右)同一个圆上,任意相邻两点之间的夹角为 36 度(黑色虚线所示),即以圆心为轴旋转 36 度后图案保持不变。转 10 次后所有圆点回到最初的位置,称为 10 阶旋转对称。还可以看到,从圆心到第一个圆(蓝色)的距离不是圆心到第二个圆(黄色)的一半,也不是圆心到第三个圆(红色)的三分之一。这说明这种结构不是周期性的。

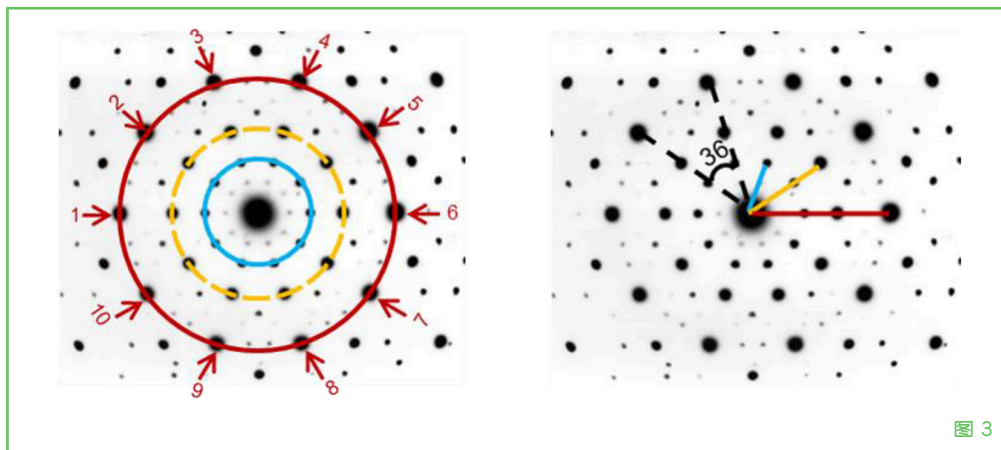


图 3

的结构不是随机的,而是有序的(谜题:你能找到这个晶体和蒙娜丽莎画像之间的联系吗?答案见文末)。

请注意,图 3 左边的圆上每个相邻原子之间的距离都是相等的。因为一共有 10 个点,所以如果你在圆心放一条轴并向任意方向旋转 36 度(一圈 360 度除以  $10=36$  度),旋转后你会得到完全相同的结构。这就是 10 阶旋转对称。但是,5 阶和 10 阶对称在周期性晶体中是不存在的,所以这个晶体肯定不是周期性的。

这就是为什么我会写下“10 阶???”这样的笔记,它实际上是“10 阶旋转对称”的简写。我还连打了三个问号,因为我知道此前从未观察到 10 阶对称的晶体。

总之,我发现了一种违背经典定义的晶体,这种晶体在当时的物理定律下是不允许存在的。那么有两个选择:要么对我观察到的现象提出其它解释,使之不再违背经典定义,要么更新现有定义,使其包含我新发现的这种晶体。接下来我会讲一讲科学界是如何逐渐相信我们需要给晶体下一个新定义的。

### 科学界对准晶体的反应:先批判,后接受

1984 年,我和同事们就这个发现发表了两篇论文 [1, 2]。全世界几千名研究人员开始和我们一起研究准晶体;现在有关准晶体的论文数量已经超过了一万篇。但是也出现了以美国科学家、两次诺贝尔奖得主莱纳斯·鲍林(Linus Pauling)为首的强烈的反对声。

鲍林甚至对我发动了个人攻击,他说:“这世上没有准晶体,只有准科学家”。他和他的支持者们认为我从显微镜里看到的是孪晶现象(图 4)。孪晶是两个相互耦合的晶体。每个晶体本身都具有有序和周期性的结构,只是因为连接在一起,才会看到 5 阶旋转对称。

图 4

5 阶对称的孪晶。(左) 由 5 块孪晶组成的铝锰晶体。每片“叶子”都是一个有序、周期性的晶体，每两片(如图中红色标记所示)构成一块孪晶且互为镜像。(右) 孪晶的衍射图案。确实与准晶体的衍射图案有几分相像(见图 1)。这张图是孪晶的整体衍射图案，而红色圆圈标记了相邻 10 个晶体中的一个晶体的衍射图案。可以看到图案是有序且周期性的，所以它满足晶体的经典定义。

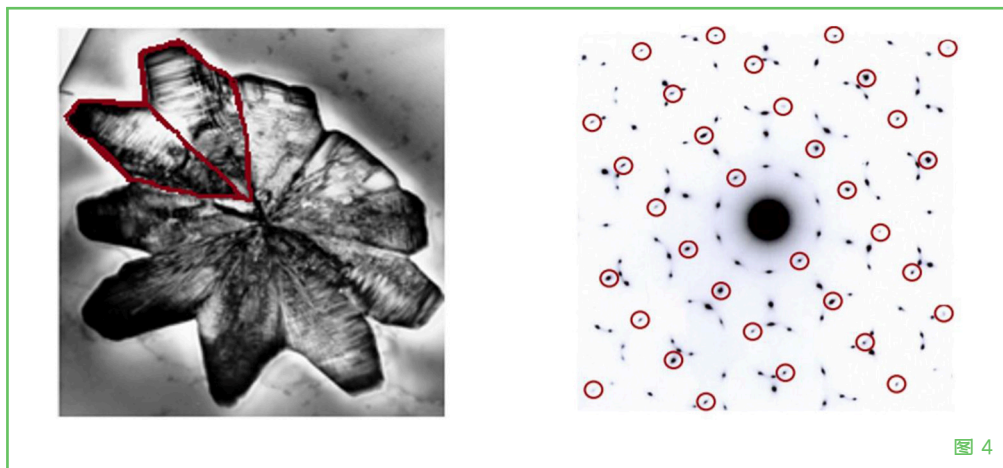


图 4

我马上去检查我的晶体里是否有孪晶。没有发现任何孪晶，我对自己的原创性发现确信无疑。我知道自己发现了一种全新的现象和材料。而鲍林对我的反对持续了十年之久！直到 1994 年他去世后，反对声才渐渐退去。那扇门终于打开了，我的发现被完全接受。

承认了准晶体，也就赋予了晶体新的定义，也为晶体研究开辟了新思路。在随后发现的数百个准晶体中，有些准晶体表现出抗老化、电学特性随温度变化而变化等非常有用的属性。用准晶体制成的产品包括斯塔姆牌不粘锅和山特维克公司的加强不锈钢。

### 给年轻人的建议

如果你想成为一名科学家，你需要培养两种品质。

首先你要成为科学全才。要对不同领域有广泛的了解，如数学、物理、化学、生物、计算机。要知道哪些现象已经被发现了，根据现有理论哪些现象是被“允许的”或“禁止的”。就我自己的发现而言，我当时很清楚晶体的经典定义“禁止”5 阶对称，而且 5 阶对称之前仅在孪晶中看到过。

但了解现有理论并不足以让你成为一名成功的科学家。还要发展专业知识。找到你喜欢做、擅长做、让你感兴趣的事——并成为这方面的专家。我自己发展了有关 TEM 的专业知识，当时能把这种显微镜用得和我一样好的人没有几个。这是我的优势，即使后来面对鲍林的严厉批评，我也能对自己的结果保持信心。

总之请记住，生活为我们提供了许多机会，而我们应该知道如何利用这些机会。还请记住，生活是由极其丰富的元素构成的。

有人问我这辈子什么时刻最幸福，我回答说最幸福的时刻是我和妻子在一起的时光，并且我们的 4 个孩子和 12 个孙子孙女出生的时

候。希望你也能体会到创造生命、理解世界的种种奇妙，祝你旅途愉快。

### 谜底揭晓

在我发现的晶体中，各圆圈直径之间的比率（图 3 右）是黄金比例——一个约等于 1.618 的无理数。在达芬奇最著名的画作蒙娜丽莎的脸上也发现了同样的黄金比例。黄金比例为观众带来愉悦的美感体验。你能看到我发现的衍射图案之美吗？

### 致谢

感谢 Noa Segev 的采访并在此基础上合作了本文。感谢“赛先生”公众号及其译者辛玲对本文中中文翻译的贡献。

### 参考文献

1. Shechtman, D., and Blech, I. A. 1985. The microstructure of rapidly solidified  $Al_6Mn$ . *Metall. Trans. A* 16:1005–12. doi: 10.1007/BF02811670
2. Shechtman, D., Blech, I., Gratias, D., and Cahn, J. W. 1984. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. *Phys. Rev. Lett.* 53:1951–4. doi: 10.1103/PhysRevLett.53.1951

线上发布: 2023 年 9 月 27 日

编辑: Idan Segev

科学导师: Idan Segev

引用: Shechtman D (2023) 准晶体, 而非准科学家. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00022-zh

英文原文: Shechtman D (2020) Quasi-Crystal, Not Quasi-Scientist. *Front. Young Minds* 8:22. doi: 10.3389/frym.2020.00022

**利益冲突声明:** 作者声明, 该研究是在没有任何可能被解释为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下进行的。

版权 © 2020 © 2023 Shechtman. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

## 少年审稿人



8TH GRADE "NACHSHON" CLASS, "MAKIF AMIT SCHOOL ISRAEL", 年龄: 12-13  
这个班的学生广泛地学习科学、计算机科学和数学。这个班级被称为 "Nahshon", 意在强调团队合作和领导能力。班主任为 Adva Meisel 博士。

## 作者



### DAN SHECHTMAN

达尼埃尔·谢赫特曼, 是以色列理工学院材料科学与工程系的名誉教授。2011 年他因发现准晶体而获得诺贝尔化学奖。多年来, 谢赫特曼教授获得了许多重要奖项, 包括罗斯柴尔德工程学奖 (1990)、魏茨曼科学奖 (1993)、以色列物理学奖 (1998)、沃尔夫物理学奖 (1999) 和 EMET 化学奖 (2002 年)。谢赫特曼出生于以色列特拉维夫, 拥有以色列理工学院机械工程系学士学位 (1996)、材料科学硕士和博士学位 (1968, 1972)。谢赫特曼教授与妻子 Tzipora 育有四个子女, 他还是拥有十二个孙辈的骄傲的祖父。

\*[dannys@technion.ac.il](mailto:dannys@technion.ac.il)