

准晶体发现者 Shechtman 给年轻科学家的忠告

林志忠[†]

(台湾交通大学物理研究所和电子物理系)

2017-05-16 收到

[†] email: jjlin@mail.nctu.edu.tw

DOI: 10.7693/wl20170607

在“晶体学”发展整 70 周年之际，Dan Shechtman 教授气势如虹地改写并扩展了“晶体”的定义。

准晶体 (quasi-periodic crystals, 简称 quasicrystals) 的发现者 Dan Shechtman 教授于 1941 年生于特拉维夫，是以色列的第 4 位诺贝尔化学奖得主。他在 2011 年 70 岁时获奖，是该年化学奖的唯一得主。Dan Shechtman 教授的大学、硕士和博士阶段的教育，都在以色列理工学院 (Technion—Israel Institute of Technology) 完成。接着前往美国接受 3 年的博士后训练，之后回到母校担任教职。1982 年他于例行教授休假研究期间，在美国国家标准局¹⁾ (National Bureau of Standards, NBS) 发现了铝锰合金 (Al₃Mn) 的准晶相，

从而开创了物理、化学和材料的新领域，更重写并扩展了科学家对“晶体” (crystal) 的定义。“晶体学” (crystallography) 从 1912 年 Max von Laue 开创的人类史上首次晶体 X 光衍射 (绕射) 实验算起²⁾，到 1982 年，正巧诞生 70 周年，久被公认为是一门已经发展成熟的科学，除了某些个别材料和物质结构的细节需要进一步表征与厘清之外，就不再蕴含未知概念体系和待解知识框架了。

准晶的发现是一个有趣且饶富教育意义的过程，Shechtman 教授的学养和个人魅力，决定并引领了这一新兴学科的诞生和后续进展。在 1980 年代中期发现的 3 种重要崭新材料和物质结构 (准晶、富勒烯和高温超导体³⁾) 中，只有准晶体在被发现之后，遭受到学界的一些抗拒和顽强阻力，因此直到经过约 30 年的漫长等待之后，才终于获得诺贝尔基金会的肯定。

获得诺贝尔奖之后，Shechtman 教授立刻有了许多机会，应邀到很多国家的各种大大小小的场合访问和演讲。在这些讲演以及接受访谈

当中，除了介绍从晶体学的演进到准晶学的突然破茧而出之外，他每每在叙述专业知识之后，尽心尽力指出他认为最重要的、年轻科学家的养成之关键要素。他一再着墨，反复强调希望能够启迪青年走上成功的科学研究/事业之路。他对于年轻 (实验) 科学家之养成的看法，以及为何准晶体不是被其他科学家率先发现的诠释，非常值得介绍给有心的学子以及第一线的教研人员参考、体会和效法。

Shechtman 教授归结说，准晶体并不是稀有之物 (至少有数百种合金以上)，在室温下也基本稳定，而且不难制作 (可以使用多种方法制备)，可是一直要等到 1982 年才被他自己发现，原因如下。

首先是欲在实验中发现准晶体的“有序” (order)，但却呈“准周期性” (quasi-periodic) 的晶体结构，需要使用透射 (穿透式) 电子显微镜。因为早期的准晶样品的体积都只有亚 (次) 微米大小，而传统的 X 光衍射技术需要使用到毫米尺度的样品，因此不能采用标准的 X 光衍射



图 1 Dan Shechtman 教授手持二十面体 (icosahedron) 模型 (摘自网络)

1) 美国国家标准局已于 1988 年改组为国家标准技术研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST)。

2) Max von Laue 因为发现了晶体的 X 光衍射行为而获得 1914 年诺贝尔物理学奖。X 光在 1895 年 11 月被 Wilhelm Conrad Röntgen 发现，Röntgen 因而获得史上第一个诺贝尔物理学奖 (1901 年)。但他拒绝为 X 光申请专利，谢绝同事和朋友的建议用自己的名字命名 (然而后人有时还是将 X 光称为伦琴射线)，并婉拒在诺贝尔奖颁奖典礼上发言。

3) 高温超导体发现于 1986 年，次年其两位发现者 J. Georg Bednorz 和 K. Alexander Müller 即获得诺贝尔物理学奖。这是诺贝尔奖授奖历史上最快速的一次。1996 年的诺贝尔化学奖颁给了富勒烯 (fullerenes) 的发现者 Robert F. Curl Jr., Sir Harold W. Kroto 和 Richard E. Smalley。

技术来测定其三维原子排列。另外一个重要原因是，当时的晶体学家仍然固守传统，只愿意接受由X光实验产生的衍射图形来断定一种物质的晶体结构，电镜的衍射数据则被认为是不具备充分说服力的⁴⁾。

——在准晶体被发现之前，“晶体”的定义是指拥有数学上“有序”并且呈“周期性”(periodic)排列的三度空间物质结构。就旋转对称(rotational symmetry)而言，一个周期性的三维晶体只能出现1, 2, 3, 4和6重旋转对称，而彻底排除5重以及更高重旋转对称的可能性。70年来，毫无例外的，千千万万种已知的晶体，其原子格点都呈周期性的排列。

其次，Shechtman教授坦率而勇气十足地自称他本身是一位“真正的电镜(术)专家”(an expert in transmission electron microscopy)。即是说，他熟悉电镜的设计原理、机械构造、拆解、组装、样品制备和测量、数据判读与分析，以及所有相关的一切细节，而不仅是熟练例行性操作手续而已。他认为自己成为真正的电镜(术)专家的一个准则是，在以色列理工学院经年反复讲授这一门课程。因为Shechtman教授确信自己是一位“真正的电镜(术)专家”，非常清楚自己测量到的意料之外——与教科书内容不符，违反了教科书讲授内容——的讯号具有特殊意义，而不是来自于实验差错、样品污染，或制备缺失等。因此他敢于对抗权威，捍卫并坚持自己发现了前所未有的新物质型态，即含有5(或10)重旋转对称的崭新非周期性(aperiodic)晶体结构。

由于颠覆了经典晶体学中5重

旋转对称不可能存在的认知，从1984到1994年的整整10年间，Shechtman教授的发现遭遇到许多反对的声浪。其中，最强大的阻力和反对声音来自两次诺贝尔奖得主Linus Carl Pauling教授(1954年得化学奖，1962年得和平奖，1994年去世)。但是，Shechtman教授不愧是人中之龙，他自始坚信这次晶体学

论战，Pauling一定错了，终将惨败！Shechtman的坚持是有其学养依据的，因为他认为Pauling虽然是一位当代最伟大的(美国)化学家，却并不是电子显微镜(术)专家。他斩钉截铁地说，Pauling闯进了别人的学术专业领域，所以做出了不够专业(外行)的错误判断。作为一位西方文化的子民，没有所谓“为尊者讳”的顾忌，Shechtman教授甚至认为，在双方长年对阵之中，是Pauling使自己成为了晶体学界的笑柄。因为十年之间，Pauling“墨守成规”地发表了许多篇论文，试图停留在经典晶体学的框架之内，解释准晶体的衍射行为。然而，就这一点而言，Pauling还是非常值得敬佩的。他生于1901年，在80多岁到90多岁，而且获得过两次诺贝尔奖之后，仍然竭尽心力，努力构思一个又一个理论模型，专注撰写一篇又一篇学术论文，试图了解最新被发现的物质体系的构成。这岂不正是“活到老，学到老”，为求真知、求理解而孜孜矻矻的典范。

其三，Shechtman教授认为在

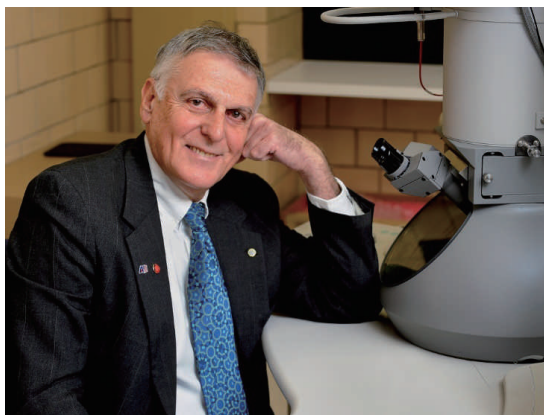


图2 Dan Shechtman教授的领带上印着准周期图形，是以色列理工学院在他获得诺贝尔奖之前的某年生日特地为他设计精制的。获奖之后，这款领带成为该校最畅销的纪念品之一(摘自网络)

研究过程中，必须特别注意细节(“details”)，尤其是万一观测到不合常理、意想不到的细节(“surprising details that you don't expect”)时，更是千万不可以轻易忽略掉(丢掉数据!?)。他说对于这些意料之外的细节，一定要仔细探究，直到找出原因(“Study and find out what it is.”)。很多时候，违反常理的细节确实来自于实验失误或是人为差错，但也有一些时刻，这里就是发现科学新知识的关键点。Shechtman教授更强调，对于这些不寻常的细节，一定要反复验证、验证，再验证，以确定测量结果的正确性——他说，在公开数据之前，要好好检验10次。一旦肯定测量数据是正确的，就必须坚持，不畏权威，更不用怀疑自己的测量结果与教科书上传授的知识概念不符。总之，Shechtman教授对于数据的坚定信心来自于他已经把自己培养成为一位“真正的电镜(术)专家”，他知道自己在做什么，看到了什么，并且确信排除了各方面的可能错误，因此这些数据必定是真确的，是反映

4) 直到1987年，以日本和法国为主的材料学家才成功生长出足够大尺度的准晶体样品，并进行X光衍射实验。至此，晶体学家才首肯有5重旋转对称的晶体存在。

直截了当的事实！他建议年轻学子，在自己的研究过程中，一旦遭遇/发现这类细节，就要紧紧抓住，不可松手，绝不松手！因为这里很可能就是你的科学事业的成功之钥。如何反驳自己的实验数据与教科书上知识不符的严苛挑战，Shechtman教授则说，不要理会为何教科书上没有教导这些(新)知识，而是应该要求质疑者指出数据有何不对，哪里不妥(“Don't tell me it's not in the book. Show me what's wrong.”)，并请质疑者自己去进行实验，自己去眼见为凭。

从1982年4月Shechtman教授第一次在透射电子显微镜中观测到了5(或10)重旋转对称的准晶相，到1984年11月他的第一篇论文正式发表于*Physical Review Letters*(见下段)的两年半间，Shechtman教授获得了一些学者的支持，鼓励他应该追根究底，继续挖掘这一未知晶体结构的本质。但是同时他也遭受到了严重的挫折和打击，一些学者指控他没有读懂教科书上的内容而不知所云。前者是他在美国国家标准局的接待者John Cahn博士，后者则是他在以色列理工学院的所属研究组组长。那一位组长认为Shechtman的“胡言乱语”——大言不惭地说看到了5(或10)重旋转对称——会使研究组被嘲笑和带来羞辱，因此要求Shechtman必须离开该组。

最后，还有一个关于论文发表的故事。当发现了铝锰合金准晶排列的5重旋转对称之后，Shechtman

教授首先于1984年9月将其论文(与Ilan A. Blech教授合著⁵⁾)投到*Journal of Applied Physics*。但是*Journal of Applied Physics*的编辑并没有将论文送审，而是直接退稿。8个月之后(1985年6月)，论文才辗转刊登在*Metallurgical Transactions A*期刊上。被*Journal of Applied Physics*退稿之后，John Cahn博士方才读到了论文稿件，他即刻建议邀请另一位法国数学晶体学专家Denis Gratias博士前来国家标准局一起讨论。他们将原始论文大幅度浓缩和改写，言简意赅直陈事实。这篇一夕激起千尺浪，重新定义了物质结构知识范畴的论文，迅速被接受发表于1984年11月的*Physical Review Letters*期刊上。John Cahn无疑是Shechtman的伯乐，他们两人的学术生涯，相得益彰。John Cahn对准晶相的敏感嗅觉和能够迅速、深刻地掌握其内涵，对准晶体学的确立功不可没。这是另外一段具有高度启发意义的故事，值得读者自行去寻找文献与资料，阅读字里行间，和思考领会。在这一篇奠定了他的国际级晶体学家地位的*Physical Review Letters*论文之前，Shechtman教授只在一般性的冶金以及材料科学与工程专业期刊，发表过大约20篇论文！⁶⁾

关于家庭，Shechtman教授说他为家人感到非常骄傲，因为他有4个小孩，10个孙子，还有一位妻子。他认为最重要的一件事是，他希望当孙子们马齿增加，曾孙们也

逐渐长大之后，他的曾孙们都会留在以色列，因为那是他们的国家，他们(曾孙们)别无选择。

后记：本文取材于美国物理学会刊物*APS NEWS*(2017年3月，第26卷第3期)中Alaina G. Levine的文章*Nobel Laureate Dan Shechtman: Advice for Young Scientists*，Shechtman教授的诺贝尔奖演讲稿(Noble Lecture)，以及网络上Shechtman教授的各式演讲和接受访问的资料。感谢中国科学院物理研究所张殿琳教授和吕力教授、北京大学物理学院马中水教授，以及南京大学物理学院金国钧教授在本文出版前的仔细阅读与提出修正意见。

人性的一面：1978年年中，物理学家费曼(Richard Feynman)切除一个恶性肿瘤。Linus Pauling听说后，写了一封慰问信，请女儿Linda转交给费曼。信中Pauling劝费曼多吃维他命C，同时附上一些吃维他命C的功效的“参考文献”。结尾，Pauling又再叮咛，“附笔：不要吃甜食，少吃肉。多吃蔬菜、水果、蔬果汁和果汁。”一个多星期后，费曼回信感谢，说：“Linda已经把资料统统都告诉我了，就是你在信里详细叮咛的那些事。Linus，你最大的成就之一，就是协助生出这么可爱的女儿来。”(Pauling提倡多吃维他命C，是科学史上的一段公案。)

5) Ilan Blech是以色列理工学院的教授，他是第一位愿意仔细聆听和思考Shechtman的准晶体数据的学者。他首先提出这些电镜衍射数据可能来自于新型态的晶体相的想法。

6) 狗尾续貂一个批注：1986—1987年间，笔者也曾短暂参与过一系列的低温实验，进行准周期性超导体超晶格(superlattices)的研究。当时美国密西根大学(University of Michigan—Ann Arbor)物理系的凝聚态实验室(奢侈地)用分子束外延法(Molecular Beam Epitaxy, MBE)生长了周期性和准周期性(Fibonacci sequence)的铋—钽超晶格。我们“很好玩地”比较了两系列样品的超导特性，论文发表于*Physical Review B*，1988年第38卷第2326页。在1980年代，MBE是非常昂贵的仪器。全世界拥有MBE设备的实验室，几乎都是用于生长半导体结构或器件(组件)，用来生长金属和传统超导体(高温超导体发现的前夕)多层膜(multilayers)的实验室，少之又少。