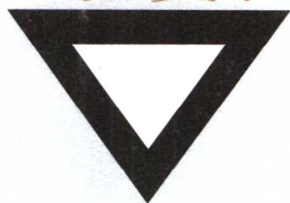
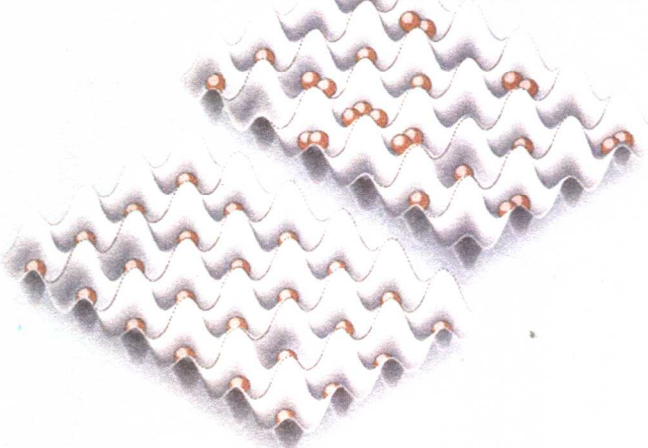


物理改变世界



边缘奇迹 相变和临界现象

Phase Transitions and Critical Phenomena



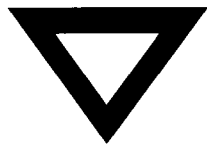
相变和临界现象是物理学中充满难题和意外发现的领域之一。精确的数学语言，使物理学上升为一种艺术。只有下功夫掌握数学语言的人，将来才可能在深入钻研之后享受这种艺术之美。

于 渌 郝柏林 陈晓松 著

21-49

 科学出版社
www.sciencep.com

物理改变世界



边缘奇迹
相变和临界现象

于 淦 郝柏林 陈晓松 著

科学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

边缘奇迹：相变和临界现象/于渌，郝柏林 陈晓松
著. —北京：科学出版社，2005

(物理改变世界)

ISBN 7-03-015547-5

I. 边… II. ①于… ②郝… ③陈… III. 相变-普
及读物 IV. 0414.21-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 049589 号

责任编辑：姜淑华 侯俊琳 / 责任校对：张怡君

责任印制：钱玉芬 / 整体设计：黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 7 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2005 年 9 月第二次印刷 印张：15 1/2 插页：4

印数：5 001—8 000 字数：174 000

定价：26.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈科印〉)

序 言

20 世纪是科技创新的世纪。

世纪上叶，物理界出现了前所未见的观念和思潮，为现代科学的发展打下了坚实的基础。接着，一波又一波的科技突破，全面改造了经济、文化和社会，把世界推进了崭新的时代。进入 21 世纪，科技发展的势头有增无减，无穷尽的新知识正在静候着青年们去追求、发现和运用。

早在 1978 年——我国改革开放起步之际，一些老一辈的物理学家就看到“科教兴国”的必然性。他们深知科技力量的建立必须来自各方各面，不能单靠少数精英。再说，精英本身产生于高素质的温床。群众的知识面要广、教育水平高，才会不断出现拔尖的人才。科普读物的重要性不言而喻。“物理学基础知识丛书”的编辑和出版，是在这种共识下发动的。当时在一群老前辈跟前还是“小伙子”的我，虽然身在美国，但是经常回来与科学院的同事们交往、切磋，感受到老前辈们高尚的风格和无私的热情，也就斗胆参加了他们的队伍。

一瞬间，27 年就这样过去了。这 27 年来，我国出现了惊人的、可喜的变迁，用“天翻地覆”来形容，并不过甚。虽然老一辈的物理学家已经退了退了、走的走了，他们当时的共识却深入人心。科学的地位在很多领域里达到了高峰；科普的重要性更加显著。可是在新的经济形势下，愿意投入心血撰写科普读物的在职教授专家，看来反而少了。或许“物理改变世界”这套修订再版的丛书，能够为青年学子和社会人士——包

括政界、工商界、文化界的决策层——提供一些扎实而有趣的参考读物，重燃科普的当年火头。

2005年是“世界物理年”。低头想想，我们这个13亿人口的大国，为现代物理所做的贡献，实在不算很多。归根结底还是群众的科学底子太薄；而经济起飞当前，不少有识之士又过分急功近利。或许在这当儿发行一些高质量的科普读物能够加强公众对物理的认识，从而激励对基础科学的热情。

这一次在“物理改变世界”名下发行的5本书，是编辑们从22种“物理学基础知识丛书”里精选出来的，可以说是代表了“物理学基础知识丛书”作者和编委的心声。于淥、郝柏林、冯端、陆埏等都是当年常见的好朋友。见其文如见其人，我在急促期待中再次阅读了他们的大作，重温了多年来给行政工作淹没几尽的物理知识。

这一批应该只是个开端。但愿“物理改变世界”得到年轻一代的支持、推动和参与，在为国为民为专业的情怀下，书种越出越多，内容越写越好。

吴家玮

香港科技大学创校校长

2005年6月

再版前言

20年前写的这本小书（原作者于渌、郝柏林二人）在介绍相变与临界现象的基本概念和理论方法上发挥了一点作用，得到一些物理界同行和当时的年轻人的认可。科学出版社为纪念世界物理年，要出新版。翻阅原书，发现大部分内容经受住了时间的考验。当然，有些提法已经过时，特别是临界指数的精确计算和精密测量（主要通过太空中进行的实验），使理论与实验的符合达到空前未有的精度。由于其他承诺，不可能将全书彻底更新，但我们尽力反映若干重要的新进展。书中增加了有限系统的临界现象和量子相变两章，更新了有关临界指数计算和测量的新结果，也增加了一些插图和漫画，以帮助理解。我们希望这本小书对爱好物理，充满好奇心，又愿意认真思考的读者有所裨益。发现差错请不吝指正。

于 渌

2005年4月

初版前言

相变和临界现象是物理学中充满难题和意外发现的领域之一。不算人类关于物质三态变化的早期观察，仅仅从 1869 年安德鲁斯发现临界点、1873 年范德瓦耳斯提出非理想气体状态方程以来，对相变的实验和理论研究已经有一百多年的历史。然而，正像相变本身是普遍存在于自然界中的突变一样，相变的研究过程也经历过许多突变。

1911 年发现的超导电现象，到 1957 年才有了正确的理论解释。而 20 世纪 30 年代才发现的液体氦的超流效应，却在不到十年的时间之内，就初步掌握了它的基本规律。可是当人们用超流和超导的经验来预测氦的另一种同位素 ^3He 的超流性质时，却使实验物理学家们一再碰壁。当许多人失去兴趣，不再专门寻求之后，突然在 1971 年发现 ^3He 具有不是一个，而是三个超流相。范德瓦耳斯首先提出，以后被人们用不同名称、不同形式发表了多次的相变平均场理论，在 20 世纪后半叶以来却愈来愈与精密的实验相违，最后竟被证明是——你相信吗——在四维以上空间才正确的理论。最近几年，粒子理论中的一些根本问题，例如为什么至今观测不到理论上早就预言了的夸克（夸克禁闭），也和相变问题发生了密切关系。

相变现象丰富多彩，可以从不同的角度分类和研究。这本小书主要介绍“连续相变”，就是在相变点上不仅热力学函数连续，而且它的一阶导数也连续的相变。现在知道，这类相变和以前研究的“临界点”其实是一回事，因而通称为相变和临界现象。最近十几年来连续相变的研究进展迅速，但主要成果

只能在专著和期刊论文中找到。我们在本书中试图用比较通俗的方式，介绍这个领域中积累的知识，并且通过这些介绍，讲述一些统计物理学的基本概念。

这是一本通俗而并不轻松的书。虽然数学推导已经尽量压缩，我们仍然希望读者随时拿起铅笔来，跟随我们写写画画，这样才能更好地体会到物理内容和数学形式的统一。精确的数学语言，使物理学上升为一种艺术。只有下功夫掌握数学语言的人，将来才可能在深入钻研之后享受这种艺术之美。

本书付印之前，传来了威尔孙因为在相变和临界现象理论方面的贡献获得 1982 年度诺贝尔物理学奖的消息。“重正化群”将成为被更多人关心的科学术语。这套方法和概念还有很大潜力来解决像湍流这样的难题。愿这本小书在科普读物和科学专著之间起一点桥梁作用。

这本书里许多图片和曲线取自各种期刊和专著，我们不一一列举它们的出处。作者谨在此感谢专门为本书提供了照片和原图的阿勒斯 (G. Ahlers)、贝尔热 (P. Berge)、贝依森 (D. Beysens) 和森格尔斯 (J. V. Sengers) 教授。

作者

1983 年

目 录

序言

再版前言

初版前言

第一章 “物含妙理总堪寻”	1
千姿百态的“水”	1
“微观”和“宏观”	3
喜鹊搭桥：统计物理的妙用	5
第二章 从物质的三态变化谈起	9
理想气体	9
临界点	13
范德瓦耳斯方程	18
三相点	25
水的特殊性	29
第三章 千奇百怪的相变现象	34
广延量和强度量	34
铁磁和反铁磁相变	36
合金的有序-无序相变	44
变化多端的中间相——液晶	47
“巧夺天工”：极低温揭开的秘密	52
玻色-爱因斯坦凝聚	56
有没有永久气体	61
一种“几何”相变：渗流	63

第四章 平均场理论	66
相变的分类	67
被多次“发明”的理论	69
序参量	71
朗道理论	76
涨落和关联	81
对称的破缺和恢复	87
连续相变的物理图像	92
第五章 简单而艰难的统计模型	95
平衡态统计物理的三部曲	95
统计物理究竟能不能描述相变?	97
伊辛模型的曲折历史	100
复数和四元数	104
统计模型展览	105
闯到“收敛圆”的外面去!	110
第六章 概念的飞跃——标度律与普适性	115
实验家的挑战	116
四维以上空间才正确的理论	119
是偶然的巧合吗?	121
标度假定	125
自相似变换	127
普适到什么程度?	131
第七章 一条新路——“重正化群”	135
不动点	136
再谈几何相变	139

重正化变换·····	144
奇怪的展开参数·····	150
重正化群理论实验验证·····	155
第八章 空间维数的意义 ·····	158
涨落和空间维数的关系·····	158
理论物理怎样“钻”进了非整数维空间·····	162
连续变化的空间维数·····	165
三类几何对象的豪斯道夫维数·····	167
布朗粒子的轨迹是几维的?·····	172
上边界维数和下边界维数·····	176
第九章 特殊的“双二维”空间 ·····	179
一场争论·····	179
能实现二维系统吗?·····	182
相位涨落与准长程序·····	185
拓扑性的元激发: 涡线·····	187
能量与熵的竞争·····	190
第十章 有限系统的临界现象 ·····	194
有限尺度标度律·····	195
高于上临界维数有限系统的临界现象·····	197
有限系统临界现象的实验研究·····	198
第十一章 量子相变 ·····	200
测不准关系和量子涨落·····	200
量子比特体系的相变·····	201
光阱中稀薄原子的“超流——绝缘体”转变·····	204

第十二章 非平衡相变——自然界中的有序和混沌 ·····	206
从对流现象谈起·····	207
耗散结构·····	211
走向湍流的道路·····	218
确定论方程中的内在随机性·····	222
结束语 ·····	225
后记 ·····	230

第一章

“物含妙理总堪寻”

北京颐和园昆明湖畔、万寿山麓有一座铜亭。从长廊前往铜亭的山路穿过一个石牌坊。那牌坊上一副对联的下联总要使大自然的爱好者浮想联翩。我们且把它摘来作本章的标题。

◎千姿百态的“水”

“物含妙理总堪寻”，玩味着这隽永的哲理，登上万寿山巅。极目远眺，思绪万千。生活在两千多年前的庄子，曾有过“原天地之美，而达万物之理”的愿望。我们今天对万物的认识又如何呢？俯视昆明湖的千顷碧波，初秋的早晨，湖面上缭绕着袅袅轻烟。“波上寒烟翠”，那是从水面蒸发的水汽，遇到冷空气后凝聚成的缕缕薄雾。仰望万里云空，在没有大风的时候，彩云朵朵、铺花绣锦，织成美丽的图案。如果在冬日雪后凌晨，登上万寿山，那真



物含妙理总堪寻

是“忽如一夜春风来，千树万树梨花开”。你曾仔细观察过雪花和冰晶吗？图 1.1 是雪花冰晶中能见到的一些骨架图案，真实的冰晶当然更为丰富多彩。在一本研究雪花的专著里，搜集了近一千五百幅六角冰晶的照片，变幻无穷，琳琅满目。图 1.2 中给出了几幅冰晶的照片（文前彩图）。上面列举的这些例子，全是一种简单的物质——水的种种形态。

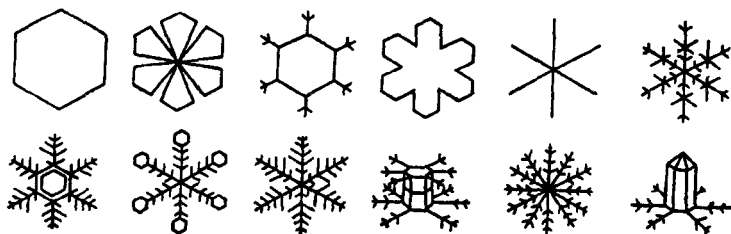


图 1.1 一些雪花骨架图案

时至今日，人们从物质的微观运动中已经寻到了许多宏观现象的“妙理”，但大自然还有更多的奥秘有待我们去探求。

◎ “微观” 和 “宏观”

水分子由两个氢原子和一个氧原子组成，分子量是 18。一滴水中有多少个水分子？这很容易估算。设水珠的直径是 2 毫米，它的体积约为 0.0042 立方厘米，质量是 0.0042 克。我们知道，每一克分子量的任何物质的分子数目等于阿伏伽德罗数 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ 。这就是说，18 克水中有 N_A 个水分子。于是，这颗水珠中约有

$$\frac{0.0042 \times N_A}{18} \approx 1.4 \times 10^{20}$$

即一万四千亿亿个水分子。其实任何宏观物体中的电子、原子、分子数目，都是这样以万亿计的。一片最纯的半导体中，杂质原子的数目仍有成千上万亿。至于取一克还是一吨物质，其差别不过百万倍。对于万亿这样的基数，这种差别倒也不那么重要了。总之，小如一滴水珠，仍旧是由大量粒子组成的宏观系统。

描述少量粒子的运动规律和相互作用的科学，可以统称之为“力学”。这包括经典力学、量子力学等等。少量粒子组成的系统，可以叫做力学系统，例如原子、分子或少量分子以及少量天体（只要把一颗星看成一个整体来考虑其运动）的集团等。描述力学系统，即使方程复杂一些，原则上也可以使用电子计算机求出与实验符合很好的结果。

对于宏观系统即由大量客体组成的系统，力学是无能为力的。即使知道了宏观系统的精确组成和全部微观的相互作用，也无法写出全部力学方程和这些方程的初始条件，更谈不上求解这些方程和由此计算宏观系统的物理性质。对于宏观系统，另有一套行之有效的描述方法。这就是使用温度、体积、压力、能量、熵（这个特别的字，后面要专门介绍）等等“宏观变量”，以及比热、压缩率、磁化率等等“物质参数”进行的热力学描述。这种描述的基础是能量守恒、热量不可能自动从低温物体流向高温物体等很少几条来自实践经验的基本规律。热力学的成功已被工业革命以来整个生产技术的突飞猛进所证明。热力学早就成为许多技术科学的理论基础。

力学和热力学是面对着微观和宏观这两个极端情形发

展起来的。然而，它们是相反而相成的科学。

◎喜鹊搭桥：统计物理的妙用

使“相反”的力学和热力学达到“相成”的基本事实，就是宏观系统由极其大量的微观粒子组成。热力学描述是对大量微观的、力学的运动“平均”的结果。

我们就从相互作用和热运动的彼此制约来看看是怎样实现这种平均的。当然不可能在这里推导统计物理的各种公式，然而那基本精神——任何一门科学的基本精神都是很简单精练的——却不难介绍清楚。

热运动的能量比例于绝对温度 $T(0^{\circ}\text{C} = 273.15\text{K})$ 。为了使 T 具有能量的量纲，应当乘上一个量纲是“焦耳/度”的常数。这就是玻耳兹曼常数

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ 焦耳 / 度}$$

以后就使用 kT 来标志热运动的强弱。由于热运动是杂乱无章的，人们常常说 kT 是无序的原因。简单的单原子气体处于温度 T 时，每个原子的平均动能是 $\frac{3}{2}kT$ 。这可以从一些更基本的假定，用“平均”求出来。

每一个特定的微观状态有确定的能量 E_i ，其中包括了相互作用能量。 $i = 1, 2, \dots, N$ 是宏观状态可能对应的一切微观状态的编号。 N 是一个极其巨大的数，任何天文数字和它相比都可以略而不计。例如，取一克分子物质，其中就有 N_A 个分子， N_A 是前面提到过的阿伏伽德罗数。这些微观粒子的各种排列组合，能够组成多少微观状态 N 呢？一般说来，我们只知道它是略小于