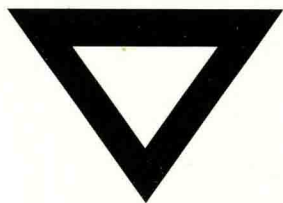


国家科技进步奖获奖丛书
物理改变世界

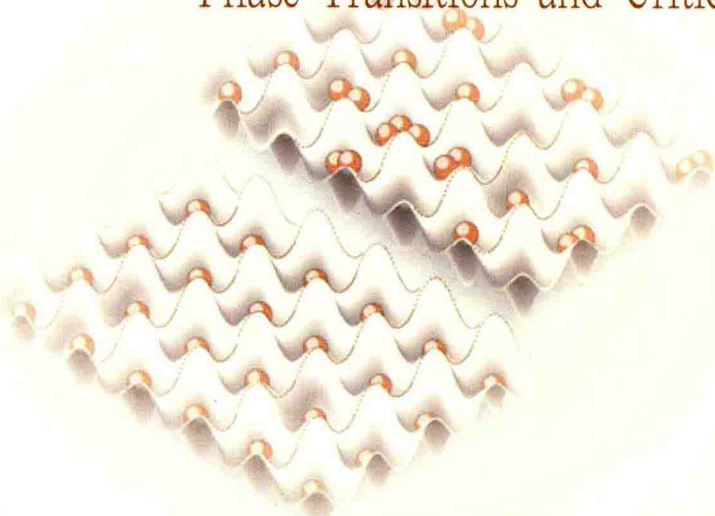


修订版

边缘奇迹

相变和临界现象

Phase Transitions and Critical Phenomena



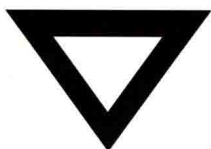
相变和临界现象是物理学中充满难题和意外发现的领域之一。精确的数学语言，使物理学上升为一种艺术。只有下功夫掌握数学语言的人，将来才可能在深入钻研之后享受这种艺术之美。

于 渌 郝柏林 陈晓松 著

 科学出版社

国家科技进步奖获奖丛书

物理改变世界



修订版

边缘奇迹

相变和临界现象

Phase Transitions and Critical Phenomena

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, 2016.4
(物理改变世界)
ISBN 978-7-03-047723-1

I. ①边… II. ①于…②郝…③陈… III. ①相变—普
及读物②临界现象—普及读物 IV. ①O414.13-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 050679 号

责任编辑: 姜淑华 侯俊琳 田慧莹 / 责任校对: 刘亚琦
责任印制: 徐晓晨 / 整体设计: 黄华斌
联系电话: 010-64035853
E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 4 月第 二 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 4 月第一次印刷 印张: 12 3/4 插页: 4

字数: 166 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

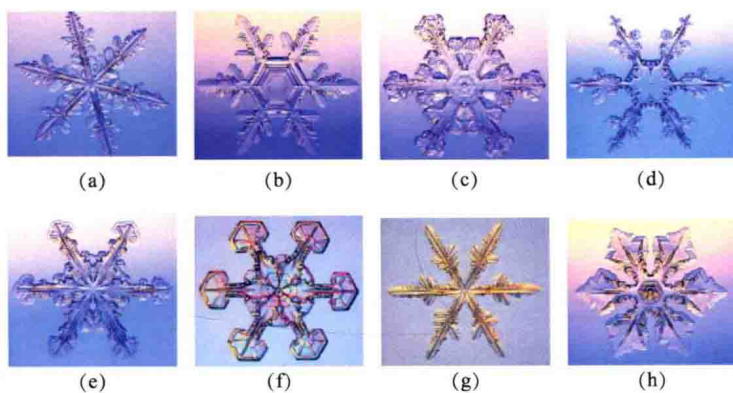


图 1.2 六角冰晶照片

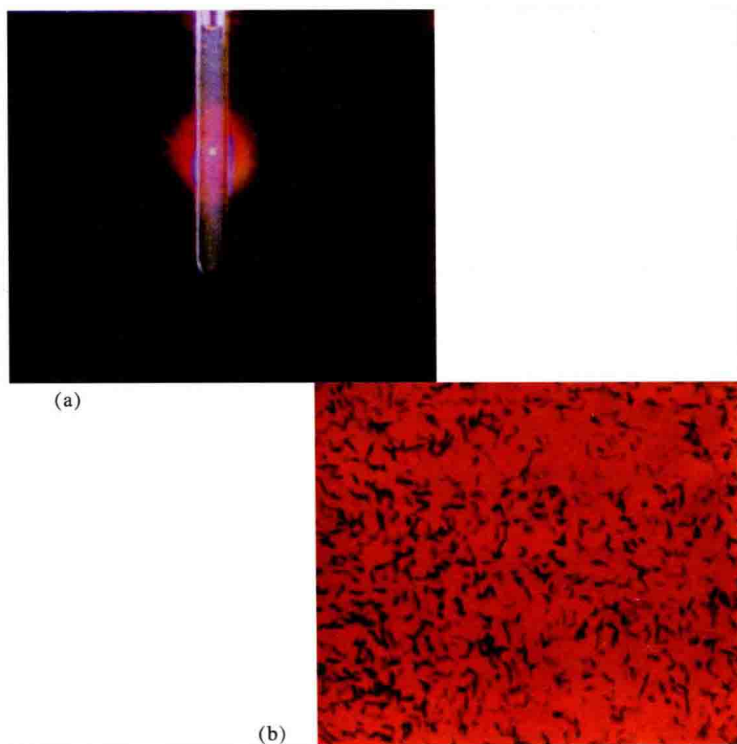


图 4.10 临界乳光照片（贝依森赠）

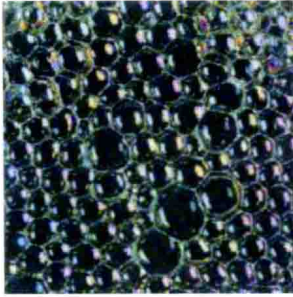


图 9.4 少数几层分子的肥皂膜

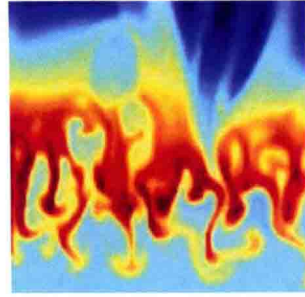


图 12.8 瑞利-泰勒不稳定性计算机模拟结果

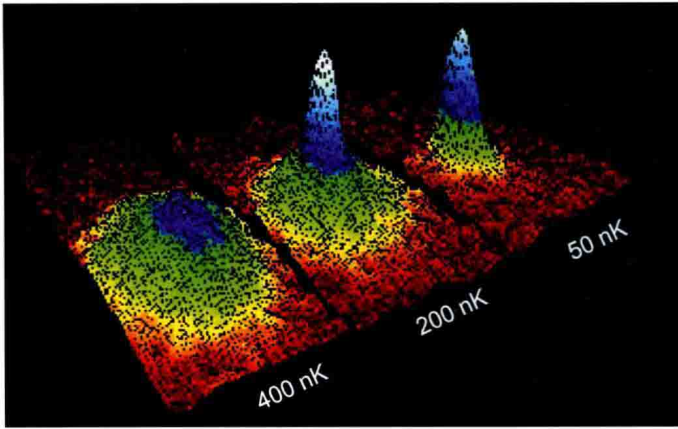
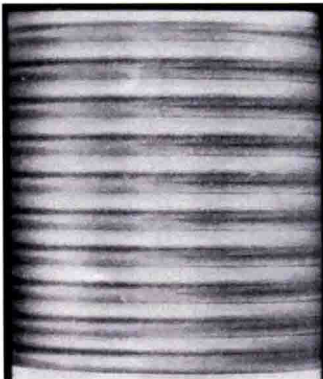
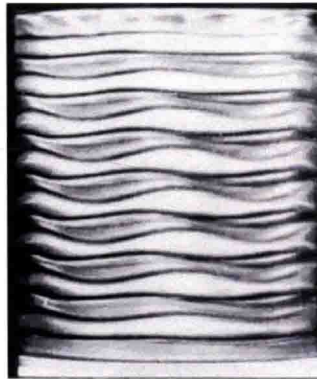


图 3.16 玻色-爱因斯坦凝聚过程中逃逸分子的速度分布变化



(a)



(b)

图 12.6 泰勒不稳定性

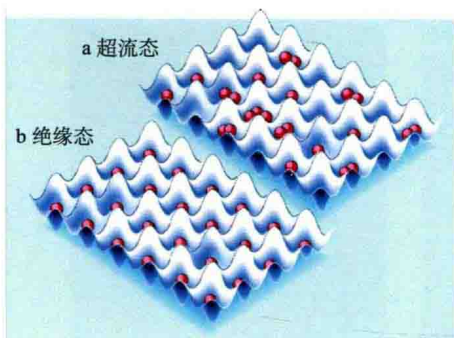


图 11.2 光阱格子中气体分子的分布 (斯图夫赠)

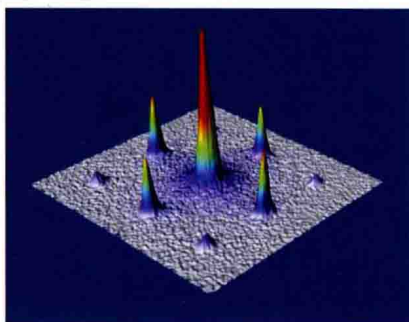


图 11.3 逃逸分子在“超导态”的速度分布 (布洛赫赠)

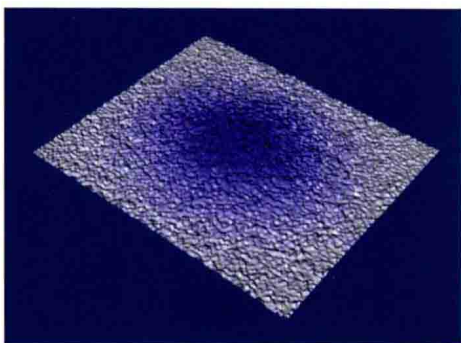
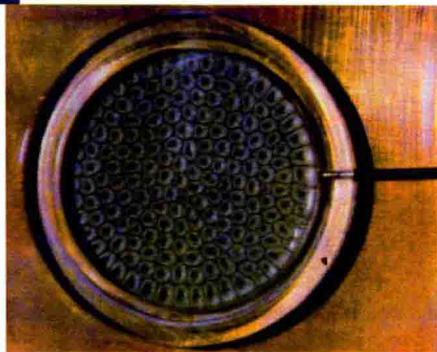


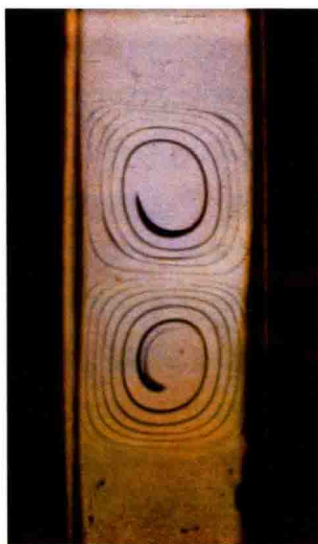
图 11.4 逃逸分子在“绝缘态”的速度分布 (布洛赫赠)

图 12.1 贝纳德不稳定性对流图案 (贝尔热赠)



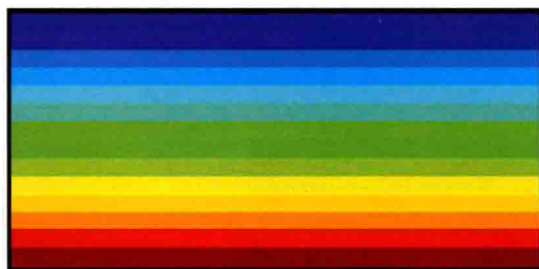


(a) 俯视图

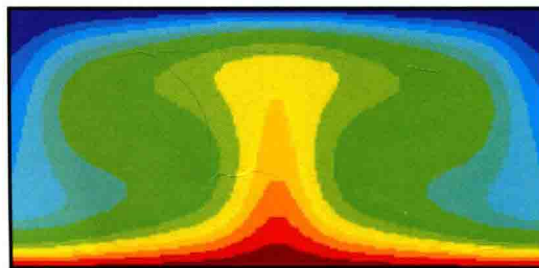


(b) “蛋糕卷”

图 12.3 贝纳尔德对流（贝尔热赠）



(a) “亚” 临界



(b) “超” 临界

图 12.5 瑞利不稳定性的计算机模拟结果

丛书修订版前言

“物理改变世界”丛书由冯端、郝柏林、于渌、陆埏、章立源等著名物理学家精心创作，2005年7月出版后受到社会各界广泛好评，并于2007年一举荣获国家科学技术进步奖，帮助我社首次获此殊荣。丛书还多次重印，在海内外产生了广泛的影响，成为双效益科普图书的典范。

物理学是最重要的基础科学，诸多物理学成就极大地丰富了人们对世界的认知，有力地推动了人类文明的进步和经济社会的发展。丛书将物理学知识与历史、艺术、思想及科学精神融会贯通，受到科技工作者和大众读者的高度评价，近年库存不足后有不少读者通过各种方式表达了对再版的期待。

在各位作者的大力支持下，本次再版对部分内容进行了更新和修订，丛书在内容和形式上都更加完善，也能更好地传承这些物理学大师博学厚德、严谨求真的精神，希望有越来越多的年轻人热爱科学，努力用科学改变世界，创造人类更加美好的未来。

同时，我们也以此纪念和告慰已经离开我们的陆埏院士。

编者

2016年3月

丛书序

20 世纪是科技创新的世纪。

世纪上叶，物理界出现了前所未有的观念和思潮，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的退了、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。于渌、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。我们在这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

丛书修订版前言 / i	
丛书序 / iii	
再版前言 / v	
初版前言 / vii	
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 / 4	
第二章 从物质的三态变化谈起 / 8	
理想气体 / 8	
临界点 / 11	
范德瓦耳斯方程 / 15	
三相点 / 21	
水的特殊性 / 24	
第三章 千奇百怪的相变现象 / 28	
广延量和强度量 / 28	
铁磁和反铁磁相变 / 29	
合金的有序-无序相变 / 36	
变化多端的中间相——液晶 / 39	

- “巧夺天工”：极低温揭开的秘密 / 42
- 玻色-爱因斯坦凝聚 / 46
- 有没有永久气体 / 50
- 一种“几何”相变：渗流 / 51

第四章 平均场理论 / 54

- 相变的分类 / 54
- 被多次“发明”的理论 / 56
- 序参量 / 58
- 朗道理论 / 62
- 涨落和关联 / 67
- 对称的破缺和恢复 / 71
- 连续相变的物理图像 / 75

第五章 简单而艰难的统计模型 / 77

- 平衡态统计物理的三部曲 / 77
- 统计物理究竟能不能描述相变？ / 79
- 伊辛模型的曲折历史 / 81
- 复数和四元数 / 84
- 统计模型展览 / 85
- 闯到“收敛圆”的外面去！ / 89

第六章 概念的飞跃——标度律与普适性 / 93

- 实验家的挑战 / 93
- 四维以上空间才正确的理论 / 96
- 是偶然的巧合吗？ / 98
- 标度假定 / 101
- 自相似变换 / 103

普适到什么程度? / 107	
第七章 一条新路——“重正化群” / 110	
不动点 / 111	
再谈几何相变 / 113	
重正化变换 / 118	
奇怪的展开参数 / 122	
重正化群理论的实验验证 / 126	
第八章 空间维数的意义 / 129	
涨落和空间维数的关系 / 129	
理论物理怎样“钻”进了非整数维空间 / 132	
连续变化的空间维数 / 134	
三类几何对象的豪斯道夫维数 / 136	
布朗粒子的轨迹是几维的? / 141	
上边界维数和下边界维数 / 144	
第九章 特殊的“双二维”空间 / 146	
一场争论 / 146	
能实现二维系统吗? / 148	
相位涨落与准长程序 / 151	
拓扑性的元激发: 涡线 / 152	
能量与熵的竞争 / 154	
第十章 有限系统的临界现象 / 158	
有限尺度标度律 / 159	
高于上临界维数有限系统的临界现象 / 160	
有限系统临界现象的实验研究 / 161	

第十一章 量子相变 / 163

测不准关系和量子涨落 / 163

量子比特体系的相变 / 164

光阱中稀薄原子的“超流——绝缘体”转变 / 166

第十二章 非平衡相变——自然界中的有序和混沌 / 168

从对流现象谈起 / 169

耗散结构 / 172

走向湍流的道路 / 177

确定论方程中的内在随机性 / 181

结束语 / 183

实验和理论的相互促进 / 183

科学的进步是集体智慧的结晶，需要多种人才的协作和
不同途径的配合 / 184

不同学科的交叉和渗透 / 184

千里之行，始于足下 / 186

后记 / 187