



The Series of Advanced Physics of Peking University

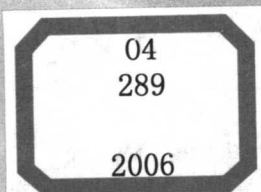
北京大学物理学丛书

软物质物理学导论

陆坤权 刘寄星 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书

软物质物理学导论

陆坤权 刘寄星 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

软物质物理学导论/陆坤权,刘寄星主编. —北京:北京大学出版社,2006.7

(北京大学物理学丛书)

ISBN 7-301-08167-7

I. 软… I. ① 陆… ② 刘… II. 物理学 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 113989 号

书 名: 软物质物理学导论

著作责任者: 陆坤权 刘寄星 主编

责任编辑: 周月梅 孙 琰

标准书号: ISBN 7-301-08167-7/O · 0625

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 话: 邮购部 62752015 市场营销中心 62750672 编辑部 62752021
出版部 62754962

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

印刷者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

850 毫米×1168 毫米 32 开本 22.625 印张 587 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn



陆坤权，中国科学院物理研究所研究员、软物质物理实验室学术委员会主任。1964年毕业于北京大学物理系，1967年于中国科学院物理研究所研究生毕业。1979—1981年在美国西雅图华盛顿大学做访问学者。发表论文180余篇，获专利9项。曾获国家科技进步二等奖，中国科学院科技进步奖二等奖、自然科学奖二等奖。



刘寄星，中国科学院理论物理研究所研究员。1964年毕业于北京大学物理系，1985年获美国得克萨斯大学物理学博士学位。曾任中国科学院理论物理研究所副所长。与人合著《生物膜泡曲率弹性理论》和《从肥皂泡到液晶生物膜》。曾获国家自然科学奖二等奖和中国科学院自然科学奖一等奖。

《北京大学物理学丛书》 第二届编委会名单

主 任：高崇寿

副 主 任：(按姓氏笔画排,下同)

编 委：	刘寄星	陈晓林	周月梅	夏建白
	聂玉昕	阎守胜	黄 涛	
	冯世平	田光善	孙昌璞	朱 星
	朱邦芬	宋菲君	肖 佐	邹振隆
	林宗涵	欧阳钟灿	俞允强	胡 岗
	闻海虎	顾卫宇	韩汝珊	解思深

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科.几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破.物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步.物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导.

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材.

本丛书分两个层次.第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用.它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可

能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质.第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作.这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果.学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科.

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用.

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

编者序言

自从 P. G. de Gennes 将他那篇有名的诺贝尔物理学奖获奖演说以“软物质”冠名以来^①,软物质的称谓变得日益普遍。按照 de Gennes 的说法,软物质的研究对象包括了聚合物、液晶、表面活性剂、胶体、乳状液、泡沫、颗粒物质以及生物大分子等与人们的日常生活及工业技术密切相关的物质状态。

实际上,软物质在上述各领域的研究历史均已百年以上。在很长一段时期内,主要是由化学家,特别是物理化学科学家对其开展探索。不少有名的物理学家曾对软物质的研究作出过重要贡献。如果开出一个对软物质各领域作出过杰出贡献的科学家的名单,德拜(Debye,胶体和聚合物物理)、朗缪尔(Langmuir,胶体物理和膜)、昂萨格(Onsager,胶体、液晶和聚合物物理)、朗道(胶体物理)、P. Flory(聚合物物理)、P. G. de Gennes(液晶物理、聚合物物理、颗粒物质和乳状液)、G. Friedel(液晶物理)、C. Frank(液晶物理)、M. Volkenstein(聚合物物理、生物大分子物理)、I. Lifshitz(聚合物物理)和 S. Edwards(聚合物物理和颗粒物质物理)等 20 世纪著名物理学家的名字会当之无愧地列于其中。

20 世纪物理学发展的主流长期被相对论与量子力学所主导,然而,随着物理学对物质运动和结构基本规律的探索的日益深入和拓展,一些与其他学科密切结合的新的综合研究领域逐步涌现并变得越来越重要。软物质物理学便是这样一个与化学、生物学研究紧密结合的领域。

^① de Gennes P G. Mod. Physics, 1992, 64: 645—648.

软物质的基本特性,按照 de Gennes 的概括,在于其复杂性和柔软性。所谓复杂性至少有三层含意:一是构成软物质的基元多数是化学结构颇为复杂的链状和支状分子(如各种聚合物分子)或分子集团,远比量子物理学处理的单原子或多原子组成的简单分子复杂;二是这些分子本身具有不同的功能团,如两亲分子的不同部位对周围介质具有不同的响应;三是由这些分子自组织或自组装形成了各种复杂结构,如蛋白质分子的折叠、表面活性剂分子在溶液中形成的单连通和多连通结构、镶嵌聚合物的奇妙结构和胶体悬浮液中胶体颗粒聚集形成的分形结构,等等。所谓柔软性指的是软物质表现出来的对外界影响的特别敏感性。例如,天然橡胶分子的 200 个碳原子中,只要有一个与硫原子发生作用,就会使天然橡胶汁从液体变成具有弹性的固体;一滴卤水就能使一锅豆浆凝结成豆腐;一滴骨胶可以使墨汁长期稳定而不沉淀;一颗钮扣电池可以驱动液晶手表工作几年。软物质的这一由于受到外界微小的作用力而发生巨大状态变化的特点,犹如雕塑家用拇指轻压就能改变黏土的外形一般。这便是 de Gennes 将之称为软物质的由来。

胶体、液晶、聚合物、表面活性剂、泡沫、乳状液和生物大分子等,除液晶之外,传统上属于物理化学和生物化学的研究对象,近 20 年来才成为凝聚态物理关注的新领域。物理学的研究目的在于寻求这些过去分属于相互孤立的研究分支的物质的共性规律。从物理学研究的观点来看,这些物质的共性主要表现在以下三点:

(1) 介于原子和宏观之间的长度尺度对软物质的重要性。

典型的胶体颗粒的大小在微米尺度。聚合物链的分子尺度大致在数十纳米,而由两亲分子形成的自组装结构的尺度也大致如此。因此从构造理论模型的角度考虑,处理这些对象可以而且应当用粗粒化模型,而不必考虑物质在原子尺度上的每一个细节。粗粒化模型研究特别强调的是物质运动规律的普适性,例如人们不必从构成聚合物长链的单元特性出发,而是从聚合物分子的拓扑性

质——一根在空间不相交的细长柔软的曲线出发来揭示聚合物的许多特性。

(2) 涨落和布朗运动对软物质的重要性。

尽管大多数软物质分子的尺度远大于原子尺度,然而相对于发生在所有热力学系统中的涨落——布朗运动而言,它们又足够小,其相应结构的结合能和形变能一般均可与热能相比拟。因此,软物质系统处于不断的布朗运动中。溶液中的聚合物分子链不断地伸长和旋转;两亲分子形成的膜结构也并非坚硬的刚性平板,而是在布朗运动的影响下持续地弯曲伸缩。

(3) 软物质自组织或自组装结构的丰富多样性。

与布朗运动相联系的一个重要事实是大多数软物质系统必然趋向平衡态。不过软物质系统的平衡态常常不是枯燥无味的均匀态,而是由软物质系统中熵和能量的微妙平衡自发出现许多复杂结构的各种物相。这种自组装结构不仅可以出现在分子尺度,而且可以逐级发生,出现在超分子尺度(如两亲分子胶束)以及更高层次上的复杂结构。这些复杂结构的出现完全不需要外力的参与,而仅由热力学第二定律推动。

由此不难看出,物理学概念和方法的引入必然会大大推动对软物质共性和定量规律的深入探索。

软物质研究的重要性不仅表现在将凝聚态物理学的基础研究推进到更为复杂和丰富多彩的领域,而且由于各类软物质与人类日常生活和各种工业技术关系密切,具有特别重要的应用前景。出于这两方面的大力推动,近十年来软物质物理学研究已成为国际物理学界关注的蓬勃发展的热点领域,不少重要物理刊物均新辟了以软物质为题的栏目,研究论文和成果迅速增加,进展引人注目。

鉴于软物质物理学研究的重要性,为了推动我国软物质物理学研究的开展,我们曾于 2000 年 6 月在北京举办过一次为期两周

的“软物质物理暑期学校”，共有来自国内、外的 100 多位科学工作者参加。两位多年从事软物质物理学研究的外国物理学家应邀在这次暑期学校作了系统讲演，一位是美国芝加哥大学物理系的 T. A. Witten 教授(扩散限制分形生长 Witten 模型的提出者)，另一位是法国法兰西学院固态物理实验室的 D. Quéré 博士(著名的纤维浸润膜厚度测量实验的完成人)。此外，还有十几位从事软物质各领域研究的学者分别报告了自己的研究结果。这些工作都是当今软物质研究的前沿。

考虑到国内读者对软物质物理学学习和研究兴趣的日益增加以及缺乏基本参考书的现实，应同行们的要求，我们根据上述暑期学校的教学交流内容，邀请两位讲演人和部分专家根据自己的研究领域撰写了有关章节，编出了这本《软物质物理学导论》。全书共分三篇 26 章：第一篇 5 章为软物质物理学概论，介绍了软物质的基本特性和研究方法；第二篇 9 章论述了软物质的表面和界面物理；第三篇 12 章分别介绍了软物质物理学研究的若干领域，包括软物质的自组织、生物膜膜泡形状、胶体物理、电流变液、二维泡沫系统、生物大分子和颗粒物质等方向。由于软物质物理学涉及的学科领域非常宽，撰写一部平衡地包含各领域内容的系统的而又有深度的书籍实属难事。本书显然达不到学术专著的水平，但可作为希望学习软物质物理学的本科生和研究生的一本参考书，同时也可供有关教师备课使用。对于希望从事软物质物理学研究的科研人员，本书应能起到引导入门的作用。为了方便读者继续深入，书末给出了进一步阅读的主要参考书目录，列出了软物质各主要领域的有关专著和国外近期出版的几本软物质物理学教科书。

本书撰稿人的学科专业谱分布很宽，写作风格各不相同，讨论深度也不一致。主编在编辑过程中虽尽力统一格式，订正专业术语，但很难做到完善。同时，由于撰稿人众多，主编未能做到全书符号统一。除第一篇和第二篇各自用了统一的符号外，其他各章中力

求做到章内符号一致。此外,主编对撰写人的原稿作了一些删节、补充,对第一、二篇译文作了校正,并在书中必要处加了若干注解,以利读者阅读。尽管如此,相信书中还会存在各种错误,望读者不吝指正。

本书得以完成,我们要感谢全部撰稿人,感谢他们在撰稿中付出的大量劳动。其中要特别感谢 Witten 教授和 Quéré 博士把自己正在撰写的书稿的有关章节在原书出版之前寄给我们,翻译后用中文出版^①,我们在第一篇和第二篇首页分别表达了对他们和文稿翻译者的谢忱。除在本序言后列出全部撰稿人名单外,我们还在第三篇每章首页的注解栏中注明该章撰稿人(包括译稿人)姓名,以感谢他们无私的贡献。

本书的第一篇以英文文稿交稿,第二篇以法文文稿交稿。第三篇中也有两章以英文交稿。为了让广大读者尽快读到第一本用中文出版的软物质物理学著作,我们在文稿翻译上得到了几位老朋友的大力帮助,特别是辽宁大学物理系李毓成教授对法文文稿的及时翻译。没有他们的帮助,这本书的出版肯定会大为推迟,对此我们心存感激。

北京大学出版社将本书列入《北京大学物理学丛书》,我们深感荣幸。40 多年前我们在北京大学物理系开始学习物理,现在母校的出版社又把我们主编的这本书提供给对物理有兴趣的读者,但愿它能对我国软物质物理学的教学和科研工作起到积极的

^① Witten 交给我们的书稿取自他和 Pincus 当时正在撰写的 Introduction to Structured Fluids. Quéré 撰写的部分来源于他与 de Gennes 和 Brochard-Wyart 合写的一本法文专著中他所承担的部分。这两本书 2004 年刚刚出版,前者为 Witten T A, Pincus P A. Structured Fluids-Polymers, Colloids and Surfactants. New York: Oxford University Press, 2004; 后者为 de Gennes P G. Brochard-Wyart F. Quéré D. Capillarity and Wetting Phenomena-Drops, Bubbles, Pearls, Waves. New York: Springer-Verlag, 2004. 我们深为我国读者能在原著出版之后很快读到它们的中文内容而喜悦。

作用。

北京大学出版社的周月梅和孙琰两位编辑为本书的出版付出了不懈努力。她们在协助我们出版本书的过程中表现出的专业精神和罕见耐心令人感动,谨此感谢。

陆坤权 刘寄星

2004 年 5 月于北京中关村

撰稿人名单

(以所撰章节出现先后为序)

- | | |
|--------------|--|
| T. A. Witten | Department of Physics, The University of
Chicago, Illinois 60637, USA |
| D. Quéré | Collège de France, F-75005 Paris, France |
| 马余强 | 南京大学物理系(江苏南京, 210093) |
| 邹宪武 | 武汉大学物理系(湖北武汉, 430072) |
| 刘寄星 | 中国科学院理论物理研究所(北京, 100080) |
| 欧阳钟灿 | 中国科学院理论物理研究所(北京, 100080) |
| 马红孺 | 上海交通大学理论物理研究所(上海, 200030) |
| 张海燕 | 上海交通大学理论物理研究所(上海, 200030) |
| 顾国庆 | 华东师范大学物理系(上海, 200062) |
| 童彭尔 | 香港科技大学物理系(香港九龙清水湾) |
| 叶曦 | 上海交通大学物理系(上海, 200030) |
| 周鲁卫 | 复旦大学物理系(上海, 200433) |
| 余建华 | 香港中文大学物理系(香港九龙九龙塘) |
| 谭永炎 | 香港科技大学物理系(香港九龙清水湾) |
| 王炜 | 南京大学物理系(江苏南京, 210093) |
| 周海军 | 中国科学院理论物理研究所(北京, 100080) |
| 张阳 | 中国科学院理论物理研究所(北京, 100080) |
| 陆坤权 | 中国科学院物理研究所(北京, 100080) |

译稿人名单

第一篇

- 顾国庆(华东师范大学理论物理研究所, 上海, 200062)
许伯铭(香港中文大学物理系, 香港九龙九龙塘)
田德诚(武汉大学物理系, 湖北武汉, 430072)

第二篇

- 李毓成(辽宁大学物理系, 辽宁沈阳, 110036)

目 录

第一篇 软物质物理学概论

——结构、性质与方法

前言	(3)
第1章 软物质的启迪	(5)
1.1 原理	(7)
1.2 自组织	(8)
1.2.1 扩展序	(8)
1.2.2 分子内的自组织	(10)
1.2.3 源于熵相互作用的自组织	(11)
1.2.4 动力学驱动的自组织	(14)
1.2.5 流	(15)
1.3 流变学	(16)
1.3.1 软物质流变学的特点	(16)
1.3.2 软玻璃	(18)
1.4 联系其他领域的桥梁	(19)
1.4.1 电子凝聚态物质	(19)
1.4.2 化学	(19)
1.4.3 生物学	(20)
小结	(20)
参考文献	(21)
第2章 溶液中的分形(几何)	(24)
2.1 无规行走聚合物	(24)
2.2 溶液中的分形	(27)

2.3	分形体附近的扩散和流动	(34)
	参考文献	(42)
第3章	几率与功	(44)
3.1	统计物理	(44)
3.1.1	热平衡与玻尔兹曼几率	(44)
3.1.2	热平衡系统的可回收功与自由能	(50)
3.1.3	格子	(56)
3.2	可变形介质引起的相互作用	(59)
3.2.1	微扰-吸引定理	(59)
3.2.2	微扰-吸引定理的推导	(61)
3.2.3	排空力	(65)
	参考文献	(67)
第4章	分形结构的起源	(68)
4.1	无规行走聚合物	(68)
4.1.1	链状聚合物空间排布的随机性	(68)
4.1.2	首末端距的几率	(70)
4.2	长链聚合物的内部结构	(79)
4.2.1	链内平均密度与聚合物的分形特性	(79)
4.2.2	中子散射	(82)
4.3	自相互作用如何改变分形维数(几何讨论)	(90)
4.4	自回避和自相互作用(更详细的讨论)	(93)
4.4.1	接触类型及其对聚合物尺度的影响	(93)
4.4.2	分形维数 D 的估计	(99)
4.4.3	自相互作用和溶剂品质	(105)
4.4.4	普适比率	(113)
4.4.5	聚电解质	(115)
4.5	胶体聚集体	(119)
4.5.1	胶体聚集的一般特性	(119)
4.5.2	最简单的聚集模型	(123)
4.5.3	多分散性和自回避的效应	(125)

4.5.4 扩散置限聚集与反应置限聚集	(128)
4.5.5 胶体聚集体的性质	(132)
附录: 扩展对称性	(136)
参考文献	(140)
第5章 相互穿插结构	(143)
5.1 聚合物溶液	(143)
5.1.1 稀溶液	(143)
5.1.2 亚浓溶液	(147)
5.1.3 浓溶液与熔体	(154)
5.2 聚合物溶液内的运动	(154)
5.2.1 单个球的布朗运动	(155)
5.2.2 内禀黏性	(160)
5.2.3 稀溶液中的聚合物: 流体动力学不透明度	(163)
5.2.4 流体动力学屏蔽	(167)
5.2.5 亚浓扩散	(168)
5.2.6 无缠结的亚浓自扩散	(172)
5.2.7 有缠结的运动	(174)
5.2.8 应力弛豫和黏性系数	(178)
附录: Oseen 张量的起源	(182)
参考文献	(183)
结语	(185)

第二篇 软物质的表面与界面物理

——液滴、气泡和液珠

前言	(189)
第6章 毛细现象的基础知识	(190)
6.1 形成界面的代价	(190)
6.2 对液滴的早期研究	(193)
6.2.1 液滴的形状	(193)
6.2.2 拉普拉斯定律	(195)