# 中文修订本前言

能够将《奇妙的物理学（修订本）》呈献给读者，我感到很荣幸。关于这本书的出版，有一个很长的故事。它的根延伸到约 40 年前。那时，它的前身《奇妙的物理学》这个小册子在苏联出版了。后续，它又出了 5 个俄文版、4 个英文版，以及意大利文版、西班牙文版、中文版、日文版、波兰文版和乌克兰文版各一个版本。

在过去的数十年中，世界经历了很大变化。我们生活中轻重缓急的次序改变了，新一代的读者成长起来了。作者在 20 世纪 80 年代中期写第一版的书稿时做梦都想不到的科学和技术新成就，如今变成了我们生活的一部分。

在《奇妙的物理学》（中文版）出版后，我受邀在上海讲授“我们周围的物理学”课程。2015～2017 年，我与复旦大学的学生进行了密切交流。他们的反馈让我明白了书中触及的话题哪些更有需求、哪些已经过时。此外，物理学的进展促使我需要写一些新的篇章，以告诉读者一些新的重大发现，如高温超导、核磁共振、热电、纳米物理学——现代研究的一个广阔新领域等，当然，还有这些新发现在日常生活中的应用。

过去 30 年，我一直生活在意大利。和在中国一样，那里的人们也非常关注饮食文化。我最初在意大利的报刊上发表的关于咖啡和葡萄酒酿造的物理学文章，是我努力想理解物理学定律如何在人类日常活动中起作用（这对我来说是一个新领域）的结果。这些文章出乎意料地受到了广泛欢迎和正面回应，被翻译成多种语言，并在电视和媒体上

进行了讨论。这便是“厨房里的物理学”这个新部分出现在书中的原因。我在《奇妙的物理学（修订本）》中显著扩充了这部分内容。在陈彦[Chen Yan（音）]教授和我的学生周正[Zhou Zheng（音）]带动下，我对中国美食的愉快体验让书中的内容增添了一些东方韵味。

我把大量时间投到了对不同层次学生进行物理学教学的活动中。我的学生中有充满天赋的大学新生，也有成熟的博士研究生。我的经验让我深信，除了必须正规和严肃地学习这门学科，老师（或作者）用艺术方法证明物理学在日常现象中的重要性也至关重要。我希望这本书从标题到内容都成功地传达了我对物理学的领悟。

我要向我的许多朋友和同事表示深切的感谢，没有他们，这本书是不可能顺利出版的。我得到了赫梅利尼茨基（D. Khmelnitsky）、帕尔诺夫斯基（S. Parnovsky）、博亚克（R. Boyack）教授和于叶林（Yu Yerin）博士的宝贵建议，这对我帮助极大。他们在书的各个准备阶段阅读了本书。书中有几章内容是基于我与巴莱斯特里诺（G. Balestrino）、布兹金（A. Buzdin）、奇基娜（I. Chikina）、弗拉赫（S. Flach）、余·加尔佩林（Y. Galperin）、格拉茨（A. Glatz）、格拉索（S. Grasso）、陈彦、村田圭三（Keizô Murata）、里加蒙蒂（A. Rigamonti）、沙拉波夫（S. Sharapov）、维兰（J. Villain）教授合写的文章撰写的。我还要在这个名单上加上值得尊敬的科学家、我的合作作者——年轻的周正博士。感谢他们的宝贵贡献。

我要衷心感谢于渌教授，没有他的专业精神和大力合作，本书的完成将无从谈起。

最后，我要感谢我的出版者侯先生（科学出版社）的热情支持和密切合作。

安德烈·瓦尔拉莫夫

罗马，2023 年

# 中文第一版序言

放在读者面前的《奇妙的物理学》是一本不寻常的书。

物理学研究自然世界运动的基本规律。20 世纪物理学的两大革命性突破——相对论和量子论，引发了科学技术革命，造就了信息时代的物质文明。手机通信、音乐/视频播放器、数码相机、互联网、全球定位系统等现代生活必不可少的便利，都离不开物理学等基础学科和立足于它们的激光、电子学、计算机等先进技术。然而，这些现代技术中运用的物理规律似乎高不可攀、神秘莫测，离中学课本里的物理学及日常生活现象越来越远。《奇妙的物理学》这本书有助于读者缩短这个距离，填补中间的空白。

俄罗斯（苏联）有很好的科普传统，许多著名科学家十分重视科普工作。《奇妙的物理学》一书的作者列夫·阿斯拉马卓夫（Lev Aslamazov，1944—1986）和安德烈·瓦尔拉莫夫（Andrey Varlamov）继承了这个传统。他们是优秀的理论物理学家，在超导理论研究等方面有卓越的贡献。该书是基于他们在著名科普杂志《量子》（*Quantum*）上发表的一系列文章写成的。不幸的是，第一位作者在该书俄文版第一版面世前早逝（1986 年），之后的工作都由第二位作者完成。

该书最大的特点是用物理规律阐述我们周围熟悉的现象，深入浅出，可以引起读者很大的兴趣。为什么搅动杯中的水，茶叶会聚集到杯底的中央？河流的弯道是如何形成的？湖泊可以有几个出水口？为什么天空是蓝色的？为什么有的酒杯会“唱歌”，有的不会？为什么肥皂水能起泡，而清水不行？为什么电缆会“嗡嗡”响？这些看起来简单或者

似乎复杂的现象，都有基本的物理规律“管”着。耐心的读者能从该书中找到许多有趣问题的答案，引发出更多的、值得思考的为什么。

这是一本认真的通俗读物，通而不俗。它能比较准确地描述和解释现象，而不是停留在“比画”的层次上。对于有高中物理基础的读者来说，一边看书，一边用笔“写写画画”，可以理解书中公式的含义和数量级的估算，为进一步学习、钻研打下很好的基础。从这个意义上讲，该书是严肃的科普读物的典范。自该书出版后，市场的反应证实了它的价值：俄文版已出第四版，英文版第三版也已问世，还出了意大利文版和西班牙文版，德文版和日文版正在筹备中。相信该书的中文版是对我们科普文库的一个重要扩充和提升。

该书的最新版中增加了许多与时俱进的内容，包括对纳米、高温超导、核磁共振、量子计算等科学技术新进展的介绍，甚至对煮咖啡和酿造葡萄酒过程中的物理现象也有引人入胜的描述，读起来饶有兴趣。希望读者喜欢这本书，并从中受益。

于　渌

中国科学院院士

2013 年 3 月于北京

# 英文版前言

我很高兴把《奇妙的物理学》(英文第三版)呈献给读者。距这本书在苏联出版已经过去了1/4个世纪。这本书的生命很长，很受读者欢迎。在英文第二版出版后，俄文第三版和第四版接着出版了，然后是两个英文版、一个意大利文版和一个西班牙文版。

在最近的1/4个世纪中，世界经历了很大变化。我们生活中轻重缓急的次序改变了，新一代读者成长起来了。作者在20世纪80年代中期写第一版时做梦都想不到的科学和技术新成就，如今变成了我们生活的一部分。随着物理学的进展，这本书也在不断发展。如今，它的篇幅比以前增加了一倍，增加了新的内容；它告诉读者许多重大发现，其中包括高温超导、核磁共振等，也展示了一个叫作纳米物理学的广阔研究领域，当然也包括这些新发现在日常生活中的应用。

最近10年，我一直住在意大利，那里的人们也非常关注饮食文化。我最初在意大利的报刊上发表的关于咖啡和葡萄酒酿造的物理学文章，是我努力想理解物理学定律如何在人类日常活动中起作用(这对我来说是一个新领域)的结果。这些文章出乎预料地受到了广泛欢迎和正面回应，被翻译成多种语言，并在电视和媒体上进行了讨论。这便是“厨房里的物理学”这个新部分出现在俄文版中的缘故。我希望读者喜欢它。

阿斯拉马卓夫和我撰写这本书既是为了满足我们的好奇心，也是为了和读者分享我们对物理学在其一切自然体现中美的赞赏。我们把大量时间放在教授各种水平的物理学上，学生中有充满天赋的大学新生，也

有成熟的博士研究生。我们的全部经验让我们深信，除了正规和严格地学习这门学科，艺术方法——教师（或作者）用它证明物理学在日常现象中的重要性——也是至关重要的。我希望本书从标题到内容都成功地传达了我们对物理学的领会。本书是以我们最近 40 年里在《量子》杂志和其他期刊上发表的文章为基础写成的。

我要向我的许多朋友和同事表示深切的感谢。没有他们，这一版是不可能完成的。首先是科学编辑、我亲爱的老朋友阿布里科索夫（A. Abrikosov）博士。他热情，具有渊博的科学知识，他的翻译、评论和指正使英文版得以面世。他的这项工作因与我的朋友兹纳缅斯基（D. Znamensky）博士和维德鲁格（J. Vydrug）的合作而大为增色。书中有几章内容是以我和我的朋友合写的文章为基础完成的，他们是巴莱斯特里诺教授、布兹金教授、加尔佩林教授、里加蒙蒂教授，还有我的高中老师夏皮罗（A. Shapiro）博士。感谢他们的贡献。

我深切感谢我的编辑：德博纳（D. de Bona）博士、帕纽什金娜（L. Panyushkina）博士、彼得罗娃（T. Petrova）博士、季霍米罗娃（V. Tikhomirova）博士和奥夫钦尼科夫（A. Ovchinnikov）博士。没有他们的专业精神和与其前几版的合作，就不会有现在这一版图书。

最后，我以自己及阿布里科索夫的名义衷心感谢另外三位，其中两位是阿布里科索夫的父母、我们的物理和生活老师 Alexei 和阿布里科索夫（T. Abrikosov），第三位是我们从学生时代起共同的朋友波克罗夫斯基（S. Pokrovski）。他们在我们的工作中起着十分重要的作用。

安德烈·瓦尔拉莫夫

罗马，2011 年

# 俄文版前言摘录

物理学是20世纪科学和技术革命的“领头羊”。今天，物理学继续决定着人类前进的方向。最明显的例子是最近高温超导的发现。它或许会急剧改变现代技术的整个体系结构。

然而，科学家越是深入宇宙和微观粒子的世界，离传统的中学物理学（也就是大多数人认为的物理学）越远。普及读物的目的是填平这条“鸿沟”，把现代物理学的精华带到好奇的读者面前，并展示其主要成就。这是一项困难的任务，不容忽视。

你手里的这本书继承了这类著作的优良传统。该书由理论物理学家和具有奉献精神的科学知识普及者撰写。它把读者带到了量子固态物理学的最新成就面前，同时告诉读者物理学定律如何在那些看来平淡无奇的事物和我们周围的自然现象中现身。最重要的是，它展示了科学家眼中的世界，足以“证明与代数的和谐”。

可惜这本书的作者之一、超导理论著名专家、长期担任科普杂志《量子》副主编的阿斯拉马卓夫教授没有看到这本书问世，这是极大的遗憾。

我希望从高中生到物理学家的广大读者，会发现阅读这本内容极为丰富的书是真正有趣、愉快和有益的体验。

阿列克谢·阿布里科索夫

2003年诺贝尔物理学奖获得者

莫斯科，1987年

# 英译者的话

让我把这本书译成英文，我感到很荣幸。现在，在这片物理学的神奇土地上，我是你的翻译，但这并非巧合。

首先，对于我来说，物理学就像“家事”一般，你大概已经猜到这一点了。我从小就熟识的许多人，原来都是物理学家。我记得当我还是一个 10 岁孩子时，阿斯拉马卓夫（当时的研究生，后来的教授）在敖德萨[①]的海滩上晒太阳。然后，我在高中时交了第一个朋友—瓦尔拉莫夫。我们决定并同时进入莫斯科理工大学学习。我们长时间地争论许多与物理学有关和无关的事。这本书中的有些题目唤醒了我对那些日子的记忆。

多亏新的《量子》杂志问世，我的“物理倾向”才得以充分发展。《量子》有一个年轻、热情的编辑团队，阿斯拉马卓夫一直在那里。他的《蜿蜒赴海》发表在第一期《量子》上。当我们成长了一些，就开始自己动手写，书中的每一章几乎都曾发表在《量子》上。

当年，我的第一篇普及作品的稿子被廖瓦（Leva，大家都这么叫他）拒绝了。他给出的理由是，不要简单地写出我们从课本上就能知道的东西，要用新的视角和清晰的例子来讲解知识。在他看来，这是普及科学知识最主要也是最困难的任务。如你所看到的，这正是本书的精神所在。

尽管英语不是我的母语，但是对物理学的热爱让我愿意翻译这本

① 敖德萨是黑海沿岸城市，传统的理论物理学春季专题讨论会在那里召开。

书。我希望自己努力注入这本书里的那份非语言知识至少部分地补偿了它的“俄罗斯味”。我想，一些不可避免的疏忽不致惹恼你，反而会把你逗乐。

当然，我不会独自冒险，你读到的是我和我的翻译同伴兹纳缅斯基（D. Znamensky）通力合作的结果，我从他那里学到了很多。由我来写这一段文字只不过是老朋友的特权，对他的贡献绝无贬损之意。

在完成翻译工作的过程中，我们想要纪念过去的伟大科学家，因此在书中加了简短的传记性脚注。

阿列克谢·阿布里科索夫

莫斯科，2000 年

# 目　　录


中文修订本前言 / i

中文第一版序言 / iii

英文版前言 / v

俄文版前言摘录 / vii

英译者的话 /ix

第一部分　实验室里的物理学及其他 …… 1

第一章　在蓝色中 …… 2

第二章　海洋电话亭 …… 12

第三章　列车上的体验 …… 23

第四章　巨大且可怕的核能 …… 29

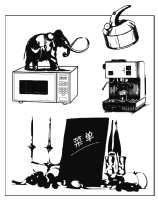
第五章　鸣响和沉默的酒杯 …… 35

第六章　魔灯之谜 …… 41

第七章　水麦克风：贝尔的一项发明 …… 50

第二部分　物理学家眼中的美食世界 …… 55

第八章　微波烤猛犸象？ …… 56



第九章　烤制好比萨的物理学 …… 66

第十章　煮、蒸、涮 …… 80

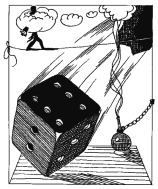
第十一章　圣诞火鸡之谜 …… 93

第十二章　意大利面的物理学 …… 97

第十三章　关于鸡蛋…… 109
第十四章　等着水开…… 122
第十五章　好咖啡的物理学…… 136
第十六章　物理学家谈酒…… 151

**第三部分　量子世界的奇迹及其在我们周围的表现**…… 169

第十七章　世纪之交新物理学的诞生…… 170
第十八章　不确定性：量子物理学的真正基础…… 181



第十九章　进入寒冷王国的漫长之旅…… 199
第二十章　太阳气：量子世界的一个窗口…… 218
第二十一章　金属电阻的故事…… 234
第二十二章　超导：一个世纪的发现、梦想和失望…… 246
第二十三章　热电：从伏打电弧到热电发生器…… 265
第二十四章　磁共振成像…… 281
第二十五章　向量子计算机迈进…… 291

**后记** …… 305
**致谢** …… 306
**名词索引** …… 307
**人名索引** …… 316
**彩图**

# 第一部分
# 实验室里的物理学及其他

在本书的第一部分，我们将给出一些物理学定律如何在地球尺度上表现的例子，包括天空为什么是蓝色的，白浪[①]为什么是白色的……我们也会讨论一些可以在日常生活中遇到的有趣的物理现象，如斟了香槟的酒杯为什么会鸣叫，炉子上的水壶为什么会“咝咝”作响等，并揭开它们的秘密。

① 白色的浪花。

# 第一章　在蓝色中

现在，白色的野马们开始表演了，在浪花里又踢又蹬，焦躁不安。

——阿诺德[①]，《被抛弃的人鱼》

上天赋予艺术家犀利的专业眼光，所以写实主义风景画里的世界绚丽多彩，并以一些自然事件为特色。即便是最好的画家，也无须了解他所描绘的景色出现的原因，那常常是深深地隐藏着的。然而，通过一幅好的风景画来研究我们周围的自然世界，甚至会比我们亲临其境更好。沉浸于画作所描绘的那一刻的自然世界，画家凭直觉全神贯注于主要的事物，略去了非本质和偶然的细节。

看看俄罗斯画家雷洛夫[②]的油画《在蓝色中》（彩图 1）吧。“白色的鸟儿在蓝天白云中翱翔，帆下的船儿在轻轻摇荡的波浪中静静地航行，仿佛是海洋里的一只白色的鸟儿。”这个评论出自俄罗斯著名艺术评论家费奥多罗夫-达维多夫。在莫斯科特列季亚科夫美术馆里看着这幅奇妙的油画时，你会忘记身在何处，觉得自己像是这场自然盛宴的一位嘉宾。

不过，我们在这里不谈美学。让我们用研究者的眼光来观察那幅油画

① 阿诺德（M. Arnold，1822—1888），英国诗人和评论家。
② 雷洛夫（A. A. Rylov，1870—1939），苏联画家。

吧。首先，画家是在哪里画的这幅风景画呢？他是在海边的一块岩礁上，还是在一条船上？

他必然是在一条船上，因为画的前景里没有碎浪，波浪的分布是对称的，其对称性没有受到附近海岸的影响。

有一条船漂在远处，风紧鼓着它的帆。让我们来估算一下风速吧。我们很容易想到，风速可以浪的高度和其他自然物为参照来估算。蒲福[①]爵士在 1806 年就引入了风力的十二分级。他将风力与其对陆地上物体和海浪的效应联系起来（表 1-1）。这个分级被国际气象委员会批准并沿用至今。

**表 1-1　蒲福风级**

| 蒲福风级 | 空气状态 | 风速 | | 海面描述 |
|---|---|---|---|---|
| | | 节 | 英里*/小时 | |
| 0 | 无风 | ＜1 | ＜1.15 | 海面如镜 |
| 1 | 软风 | 1～3 | 1.2～3.5 | 形成鳞状涟漪，无泡沫波峰 |
| 2 | 轻风 | 4～6 | 4.6～6.9 | 小碎浪，仍短，但更显著；波峰透明，不破碎 |
| 3 | 微风 | 7～10 | 8.0～12 | 大碎浪，波峰开始破裂，透明泡沫或见散乱白浪 |
| 4 | 和风 | 11～16 | 13～18 | 小波浪变大，常见白浪 |
| 5 | 清劲风 | 17～21 | 20～24 | 长得多的中等波浪，形成许多白浪，偶见水花 |
| 6 | 强风 | 22～27 | 25～31 | 开始形成大浪，到处是白色泡沫波峰，多半有水花 |
| 7 | 疾风 | 28～33 | 32～38 | 大浪堆涌，碎裂的波浪形成的白沫开始在风吹下形成沿风方向的条带，开始可见飞沫 |
| 8 | 大风 | 34～40 | 39～46 | 更长的中等高度波浪，波峰边缘破裂形成飞沫，泡沫在风吹下形成沿风方向的明显条带 |
| 9 | 烈风 | 41～47 | 47～54 | 高浪，沿风方向的稠密泡沫带，海浪开始翻滚，水花影响了可见度 |

① 蒲福（F. Beauford，1774—1857），英国海军上将，水文学家，制图家，英国水文局局长。

续表

| 蒲福风级 | 空气状态 | 风速 | | 海面描述 |
|---|---|---|---|---|
| | | 节 | 英里/小时 | |
| 10 | 狂风 | 48～55 | 55～63 | 具有突起波峰的很高的浪，由此形成的大片泡沫在风吹下形成沿风方向的稠密白色条带，整个海面呈白色，翻滚加剧，可见度受影响 |
| 11 | 暴风 | 56～65 | 64～75 | 特别高的浪，中小船只可能长时间被浪阻挡视线，海面被一片片长长的白色泡沫带所覆盖，波峰的边缘被吹为泡沫，可见度受影响 |
| ＞12 | 飓风 | ＞65 | ＞75 | 空气中满是泡沫和水花，海面因猛烈的水花喷溅而呈一片白色，可见度受严重影响 |

*：1 英里≈1.61 千米。

我们再回到《在蓝色中》这幅画上。画里的海很平静，海面上几乎看不见白浪。按照蒲福风级，这相当于轻风，风速在 16 千米/小时左右。

除了蒲福风级，我们也可以从海面和天空的亮度对比来判断风速。通常，在开阔的海面上，地平线看起来是一条清晰的边界。只有在完全无风时，海面的亮度才变得与天空的相同。在这种情况下，海面和天空的亮度对比消失，海天一色，无法区分。这种情况比较罕见，因为必须几乎完全无风，蒲福风级为零。即使最轻微的风也会搅动海面，这时海面上倾斜波纹的反射系数不再等于 1，就出现了海面与天空之间的亮度对比度。这可以用实验来研究。俄罗斯研究船“德米特里·门捷列夫号”在远航期间测量了海天对比度与风力的关系。在图 1-1 中，测量结果用加号表示，实线表示拜尔科和佩列文得到的理论关系。

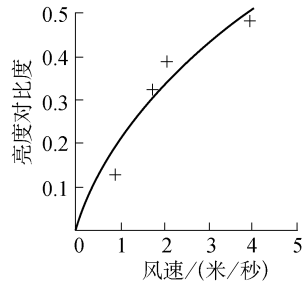



**图 1-1**　海面与天空的亮度对比度和风速的关系

那么，为什么白色浪尖与蓝绿色的海水如此不同呢?

海面的颜色是由许多因素决定的，其中重要的因素有太阳的位置、天空的颜色、海面的形态和海水的深度。浅水区，海藻和固体粒子污染的存在也是很重要的因素。所有这些因素都影响光从海面的反射、在海水中发生的散射和吸收。这使得准确预测海面的颜色是不可能的。但是我们仍然可以知道一些细节。例如，我们能够解释为什么前面邻近画家处的波浪色调比其他地方的色调暗得多，为什么接近地平线处的海面变得较为明亮。

当光波入射到两种具有不同光学密度的介质的分界面上时，反射的程度取决于入射角$\alpha$和介质的相对折射率，并用反射系数定量表示。反射系数等于入射光与反射光的强度[①]之比。反射系数也取决于入射角。要看到这一点，你可以观察光从抛光桌面的反射现象。桌面上透明的清漆是稠密的光学介质。你将会看到，切线方向的射线（$\alpha \to \pi/2$）几乎完全被反射，并且入射角越小，透入较稠密介质的光便越多。从边界反射的光少，故反射系数随入射角的减小而降低。

我们来看一个波浪的示意图（彩图 2）。显然，从波之间的波谷和波峰到观察者眼睛的射线的入射角$\alpha_1$和$\alpha_2$是不同的，且$\alpha_2 > \alpha_1$。故较多的光从远处进入观察者的眼睛，波浪前侧的海面比远处平坦处的海面要显得暗。当然，在波涛汹涌的海上，角$\alpha$是变化的。但从足够远处开始，较暗波峰的角迅速减小，即使$\alpha_2$仍大于$\alpha_1$。在靠近地平线的地方，观察者看不到一个一个波浪，只看到一个平均模式，波之间的谷是看不见的，因而波的较暗侧渐渐地消失了。出于这个缘故，画中靠近地平线处的海面看起来比前景中的明亮。

现在我们可以解释为什么浪尖是白色的了。浪尖上翻腾的水中挤满了

① 光的强度是指在一段时间内通过垂直于光传播方向的单位面积的光通量的平均值。

泡沫，它们不停地运动、变形和破裂。反射角随点而异，也随时间而异。结果，阳光几乎完全被泡沫反射了，浪尖看起来就是白色的了。

海面的颜色受天空颜色的影响很大。我们已经说过，前者实际上是不可预测的，而后者是可以用物理学原理来解释的。显然，天空的颜色取决于在大气中的阳光散射。太阳光谱是连续的，包含所有的波长。那么，为什么散射使天空变蓝而太阳似乎是黄色的呢？这可以用光散射的瑞利定律来解释。

1898 年，英国物理学家瑞利[①]爵士提出了一种光被粒子散射的理论，其中粒子的大小比光的波长小得多。他发现了一条定律。该定律指出，散射光的强度与波长的四次方成反比。为了解释天空的颜色，瑞利把他的定律应用于阳光在大气中的散射。因此，上面的陈述往往被称为“蓝天定律”。

瑞利定律的含义可以定性地解释如下。我们知道，光是电磁波，分子是由带电粒子（即电子和原子核）组成的。这些粒子在光波的电磁场中开始运动。可以认为，原子内束缚电子的位移遵循正弦定律 $x(t)=A_0\sin\omega t$，式中 $A_0$ 是振动的振幅，$\omega$ 是振动的（角）频率。故粒子的加速度是 $a=-\omega^2 A_0\sin\omega t$。加速的带电粒子自身成为电磁辐射源，发射所谓的次级波。次级波的振幅正比于发射波的粒子的加速度（如你所知，匀速运动的带电粒子形成恒定电流，不产生电磁波）。于是，次级波发射的强度与波场中电子的加速度的平方成正比（我们可以忽略较重的原子核的运动），因而正比于频率的四次方[$I\propto\alpha^2\propto(x_t'')^2\propto\omega^4$]。

现在，我们继续回来讨论天空的问题。红色光与蓝色光的波长之比为 650 纳米[②]/450 纳米≈1.44。这个数的四次方约为 4.3。因此，按照瑞利定律，被大气散射的蓝光超过红光 4 倍。结果，约 16 千米厚的大气层获得了

① 瑞利（J. W. S. Rayleigh，1842—1919），英国物理学家，英国皇家学会会长，获 1904 年的诺贝尔物理学奖。

② 1 纳米=$10^{-9}$ 米。

一种蓝色调。相反，通过大气“滤波器”到达我们的阳光中的蓝色分量则大为减少，使通过大气的太阳光获得了一种黄色调。在太阳落山时，这种颜色可能增强为红色或橙黄色，因为那时射线必须在空气中通过较长的路。显然，颜色在日出时以相反的次序变化。

有趣的是，尽管瑞利定律要求散射光的波长比散射粒子的大得多，散射强度却不取决于粒子的大小。最初，瑞利以为天空的颜色是由大气中最微细的尘埃决定的。但是，他后来确定阳光是被构成空气的气体分子散射的。十年后的 1908 年，斯莫鲁霍夫斯基[①]提出了一个想法：散射受到意想不到因素的影响——受粒子密度不均匀性的影响。斯莫鲁霍夫斯基利用这个假设解释了长久以来已知的临界乳光现象：发生于临界点附近的液体和气体内的光的强散射。最后，爱因斯坦[②]基于斯莫鲁霍夫斯基的想法，于 1910 年阐述了光的分子散射的定量理论。在气体的情况下，散射光的强度与瑞利早先的结果完全一致。

现在好像一切都清楚了。但是空气中不均匀性的起源是什么呢？空气应该处于热力学平衡状态。引发风吹的巨大不均匀性与光的波长不可相提并论，因而不会影响散射。

为了弄清楚不均匀性的起源，我们必须更仔细地讨论热力学平衡的概念。为简单起见，让我们考虑一个在密闭容器内有宏观体积的气体。

物理系统是由巨量粒子构成的。这使统计描述成为唯一可行的方法。统计处理的意思是，不去考虑各个分子，而是计算整个系统物理特性的平均值，各个分子的物理特性值完全不必相同。宏观体积内气体分子最可能的分布状态是均匀分布。但是由于热运动，气体集中于容器内某个部分也

① 斯莫鲁霍夫斯基（M. R. von Smolan Smoluchowski，1872—1917），波兰理论物理学家，从事涨落理论和布朗运动理论的经典研究。

② 爱因斯坦（A. Einstein，1879—1955），德国出生的物理学家，居住在瑞士，自 1940 年起成为美国公民，相对论的开创者，获 1921 年的诺贝尔物理学奖。

有非零概率。理论上甚至有全部气体集中在容器的其中一半，而另一半空空如也的可能。但是，这种事件的发生概率极其微小，在 138 亿年（如今估计的宇宙寿命）这么长的时间里出现一次的希望也微乎其微。

物理量对其平均值的偏离不但允许，而且实际上是由于分子热运动而不断发生的。这些偏离叫作涨落（这个词的拉丁语源意指波）。由于涨落，气体密度可能这里大那里小，结果折射率到处变化。

让我们回到关于光的散射的讨论上来。适用于密闭容器的所有推论对大气也成立。光的散射是大气密度变化引起的折射率不均匀性造成的。此外，空气是多种气体的混合物，不同分子热运动不同是不均匀性的另一个来源。

折射率不均匀性（和密度不均匀性）的典型尺度取决于温度。阳光主要是在不均匀性尺度远小于可见光波长而又远大于组成空气的气体分子的大气层内散射的。这意味着，散射受到不均匀性影响，但不受分子影响，与瑞利假设的相同。

虽然如此，天空仍然呈蓝色而非紫色，这似乎与瑞利定律的预测相矛盾。这个矛盾的出现有两个原因。第一，太阳光谱包含的紫色光比蓝色光少得多。第二，该结果与我们的“记录器件”（即人眼）的特点有关。原来，视觉感知显著取决于光的波长。表示这一关系的实验曲线如彩图 3 所示。由图可见，人眼对紫色光的感知能力比蓝绿光弱很多，所以我们看不到阳光散射中应有的紫色部分。

那么，为什么我们看到的天空中的云却一直是白色的呢？难道它们是由违反瑞利定律的粒子组成的，所以我们的结论不成立？

云是由水滴和冰晶组成的。它们虽然很微小，但是比可见光的波长大得多。瑞利定律对这些粒子不成立，散射光的强度对所有波长差不多都一样，这就使云看上去像油画上画的那样了。

现在把你的注意力转向彩图 1 中云的形状上来。画中，云的顶端呈蓬

松纤卷的絮状（这就是“积云”），而下表面轮廓清晰。这是为什么呢？我们知道，积云（区别于“片云”）由对流中潮湿空气的上升气流形成。空气的温度随海拔上升而降低。只要海拔远小于地球半径，并且到最近海岸的距离足够远，等温面（温度为常数的面）就是平行于海面的水平面。在靠近海平面处，温度的下降速度足够快，约每百米 1℃。（一般，空气温度对海拔的依赖远不是线性的，但对于海拔数英里以下的高度，这些数字是正确的。）

当上升的潮湿空气流上升到相当于水蒸气露点的高度时，它所携带的水开始凝结为微小的水滴。凝结发生处的等温面形成云的底部轮廓，这里表面不规则的尺度在数十米内，而云绵延数百乃至数千千米。因此，它们的下边界看起来几乎是平坦的。这一点被远处平行飘浮在海面上空的一排云所证实。

然而，空气上升并不在云的底部停止。空气继续向上运动并且迅速冷却。残留的水蒸气迅速凝结，先形成水滴再形成小冰晶。冰晶通常形成积云的顶部。在失去水蒸气和冷却后，空气减速，掉头从旁边绕过云流动。对流引起积云顶上圈卷形成，下降的冷空气使云块保持分离。它们因此被蓝色的天空间隔分开，不能合并为大片沉重的乌云。

彩图 1 里有一群白色的鸟在飞翔。让我们来估算一只中等大小的鸟（如质量 $m$ 约为 5 千克，翅膀面积 $S$ 约为 0.5 平方米）在无滑翔飞行中翅膀扑动的频率 $\nu$。令翅膀的平均扑动速度为 $\bar{v}$，则在时间 $\Delta t$ 内翅膀推动的空气质量为 $\Delta m = \rho S\bar{v}\Delta t$（$\rho$ 为空气密度，在 15℃的海平面处约为 1.225 千克/米$^3$）。翅膀传递给空气的总动量为 $\Delta\bar{p} = \rho S\bar{v}^2\Delta t$。为了让鸟保持在同一个高度飞行，我们必须补偿它的重量。这意味着 $\Delta\bar{p} = mg\Delta t$。我们有

$$mg = \rho S\bar{v}^2$$

由此得到翅膀的平均扑动速度 $\overline{v}=\sqrt{\frac{mg}{\rho S}}$ 。这个速度可以按通常的方式与翅膀的扑动频率 $\nu$ 及翅膀的长度 $L$ 相联系：

$$\overline{v}=\omega L=2\pi\nu L$$

设 $L\sim\sqrt{S}$ ，我们得到

$$\nu\approx\frac{1}{2\pi S}\sqrt{\frac{mg}{\rho}}\approx 2\ \text{秒}^{-1}$$

这样，根据我们的计算，这只鸟每秒扑动翅膀两次。从量级上看，这是一个很合理的估计。

让我们更仔细地讨论所得结果，这很有趣。让我们假设所有的鸟都有大体相同的身体形状（不论大小和种类）。那么，我们可以把鸟的翅膀面积与质量通过关系式 $S\propto m^{2/3}$ 联系起来。以此代入上面得到的扑动翅膀频率的表示式，得

$$\nu\propto\frac{1}{m^{1/6}}$$

由此我们得出结论，扑动翅膀频率随鸟的质量的减小而加快。这与我们的常识是完全吻合的。当然，所有鸟都有同样形状的翅膀这个假设很粗糙，大多数大鸟的翅膀要比小鸟的大得多。但这更加支持了上述观点。

值得指出的是，扑动翅膀频率的公式可以用量纲法导出（除了重要的因子 $2\pi$ ）。显然，扑动翅膀频率有赖于鸟的重量、翅膀面积 $S$ 和周围空气的密度 $\rho$ 。我们来找出这四者之间的关系吧。设 $\nu=\rho^{\alpha}S^{\beta}(mg)^{\gamma}$ ，其中 $\alpha$，$\beta$，$\gamma$ 为未知数。比较这个关系两侧的量纲给出 $\alpha=-\gamma=-1/2$ 和 $\beta=-1$ 。由此得

$$\nu\sim\frac{1}{S}\sqrt{\frac{mg}{\rho}}$$

从油画《在蓝色中》中可以找到的问题和答案远未穷尽。好奇和善于