

openyalecourses

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

世界名校名家基础教育系列
Textbooks of Base Disciplines from World's Top Universities and Experts

FUNDAMENTALS OF PHYSICS II

ELECTROMAGNETISM, OPTICS, AND QUANTUM MECHANICS

耶鲁大学开放课程 基础物理 II

电磁学、光学和量子力学

R. SHANKAR◎著

刘兆龙 吴晓丽 胡海云◎译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

非外借

“十三五” 国家重点出版物出版规划项目



世界名校名家基础教育系列
Textbooks of Base Disciplines from World's Top Universities and Experts

yaleopencourses

oyc.yale.edu

耶鲁大学开放课程 基础物理 II

电磁学、光学和量子力学

[美] R. SHANKAR 著

刘兆龙 吴晓丽 胡海云 译

机械工业出版社

《耶鲁大学开放课程：基础物理》分为“力学、相对论和热力学”与“电磁学、光学和量子力学”两卷，本书为后者，主要内容包括电磁学、光学以及量子力学的基础理论。本书可作为高等学校理工科专业学生的教材或参考书，也适用于优秀的高中生及自学人员。

Copyright © 2016 by Yale University. Originally published by Yale University Press.

This title is published in China by China Machine Press with the license from Yale University Press. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由耶鲁大学出版社授权机械工业出版社在中国（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

版权 © 2018 由耶鲁大学出版社与机械工业出版社所有。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2016-6508 号。

图书在版编目（CIP）数据

耶鲁大学开放课程：基础物理. II，电磁学、光学和量子力学/
(美) R. 尚卡尔 (R. Shankar) 著；刘兆龙，吴晓丽，胡海云译.
—北京：机械工业出版社，2018.10

书名原文：Fundamentals of Physics II：Electromagnetism, Optics,
and Quantum Mechanics (The Open Yale Courses Series)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-60824-0

I. ①耶… II. ①R… ②刘… ③吴… ④胡… III. ①物理学-高等学校-教材②电磁学-高等学校-教材③光学-高等学校-教材④量子力学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 205756 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：张金奎 责任编辑：张金奎

责任校对：张晓蓉 责任印制：孙 炜

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·26.5 印张·1 插页·537 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-60824-0

定价：89.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

Preface to Fundamentals of Physics, in Chinese

It is every author's wish that his works be available to the widest audience. This translation does that and more by allowing the student to focus on the physics without simultaneously confronting a foreign language. I thank and congratulate Dr. Zhang Jinkui of China Machine Press for a most successful completion of this mission.

My special thanks go to Professor Liu Zhaolong for her impeccable translation. In addition to preserving the content (including colloquialisms) she corrected some errors that had gone undetected by me and others. It was my pleasure to meet and thank her personally this June when I attended a conference in Beijing organised by China Machine Press.

I will close by wishing all the readers the best of luck in physics.

R. Ka

August 28, 2017

每一位作者都希望自己的作品能够拥有最广泛的读者，此中译本使学生专注于物理，不必在学习的同时面对外语，从而实现并超越了这一愿望。我感谢并且祝贺机械工业出版社的张金奎编辑，他非常成功地完成了这项工作。

我特别感谢刘兆龙教授完美的工作。除了保持原内容（包括一些口语）以外，她还改正了被我和其他人漏掉的几处错误。我很高兴与她相识。今年6月，在北京参加由机械工业出版社组织的会议期间，我当面向她表示了感谢。

最后，祝愿所有读者在物理学领域中好运！

R. Shankar

本套书（《基础物理》和《基础物理Ⅱ》）出自耶鲁大学物理学“约翰·伦道夫·霍夫曼教授”^①R. Shankar 之手。Shankar 教授是美国艺术与科学院院士，研究领域为量子场论，早期曾从事粒子物理方面的研究，曾荣获美国物理学会利林菲尔德奖。Shankar 教授不仅是一位著名的物理学家，还是一名深受学生喜爱的物理教师。在耶鲁大学的课堂上，他的课受到学生的好评和欢迎，他录制的课堂视频也在网上广泛传播^②。

《基础物理Ⅱ》共 24 章，包括电磁学、光学、量子力学等内容。它的姊妹篇《基础物理》涉及力学、相对论、振动与波动、流体、热力学等。在这两本书中，Shankar 教授精选出物理学的主干内容，将之与相应的物理思想、物理方法、物理直觉和对物理学的热爱一起呈现给读者。他的书就像他的课一样，追求高水准，既深入严谨，又清晰简练。即使在数学工具的运用方面，Shankar 教授也不做任何妥协，在书中循循善诱且坚决地使用了级数、复数等数学知识，使学生明白数学语言对于物理描述的重要性和必要性。

尽管如此，本套书并不枯燥刻板，在讲授物理知识和方法时，Shankar 教授从物理学家的角度出发，深入浅出，或是给出巧妙的比喻，或是讲述一些令人发笑的想法，以帮助读者理解，其中不乏智者的幽默与诙谐。他还常在书中给出一些学生曾提出过的问题或是学生对某些问题的答案，以缩短读者与作者间的距离。读 Shankar 教授的书，常常会让人感到仿佛有个智者坐在对面，将基础物理学的精华向你娓娓道来。这套书秉承了作者的课堂风格，逻辑性强，富于想象且睿智活泼。

书中的插图也颇具特点。现在，大部分教材都会追求精美的插图，甚至不惜采用彩图来加强效果，可是 Shankar 教授却采用了非常质朴的插图，这些图简洁达意，不做任何渲染，使人联想起教师们在黑板上面向学生手绘出的那些图。他说这样做是为了降低书的价格。由此，你感受到 Shankar 教授的爱心与幽默了吧？

在翻译这套书时，译者力图保持 Shankar 教授的写作风格，使用的语言接近口语，更像教师们的课堂用语，以期给读者亲切自然之感。Shankar 教授的书中自然

① John Randolph Huffman Professor

② 网易公开课搜索“耶鲁大学 基础物理”可免费观看全程双语字幕视频。——编辑注

地融入了一些英文的双关语，带有美国文化的烙印，个别地方还使用了英制单位，为了帮助读者理解，译者和编辑在必要的地方给出了相应的注释。

本书由北京理工大学物理学院的刘兆龙教授（第1~10章）、吴晓丽副教授（第11~18章）和胡海云教授（第19~24章）翻译。在翻译过程中，Shankar教授对于译者提出的各个问题都给予了认真耐心的解答，我们在此致以真诚的谢意！译者非常感谢北京理工大学的学生们，他们激励着我们的翻译工作，使我们更加确信此工作的意义。我们还非常感谢本书的编辑张金奎的帮助和他为本书的出版所付出的努力！

真诚欢迎读者就本书翻译的不妥之处提出宝贵的意见和建议！

译者

2018年8月于北京中关村

本书是《耶鲁大学开放课程：基础物理 力学、相对论和热力学》的姊妹篇，包括电磁学、光学和量子力学等内容。就像上一卷那样，本书基于我在耶鲁对不同班级的讲授而编写。这两卷涵盖了所有重要的主题，可用于一年的基础物理课程教学，也可以用于学生自学，教师还可以将之作为其他教材的补充。

书中的各章内容或多或少地源自我在耶鲁的讲授，有一些小的改动，不过仍延续着我的课堂风格。我经常引入一些学生们问过的问题，或是给出学生们对一些问题的答案，我相信这对读者是有益的。配套的习题和测试题发布在耶鲁的网站 <http://oyc.yale.edu/physics> 上，缺少了它们，你无法知道或是确定自己是否学好了物理。网站上还附有相应的解答。这些资源对所有人免费开放。还可以在线观看我的讲课，比如 YouTube，iTunes (<https://itunes.apple.com/us/itunes-u/physics-video/id341651848?mt=10>)，以及 Academic Earth 等^①。

我在讲课时常提及我所著的《基础数学训练》这本书，该书由斯普林格 (Springer) 出版，受众是那些希望掌握物理学中所必需的大学数学知识的人。

正如前一本书那样，本书的问世要感谢很多人。时任耶鲁学院院长、现任耶鲁大学校长的彼得·沙洛维 (Peter Salovey)，劝说加入第一批由惠留特基金 (Hewlett foundation) 资助的耶鲁公开课。戴安娜·克莱纳 (Diana E. E. Kleiner)，她是讲授艺术与经典史的邓纳姆 (Dunham) 讲座教授，在许多方面鼓励并指导我，她也是力促我编写这两本书的人。在耶鲁大学出版社，乔·卡拉米亚 (Joe Calamia) 不断地给予我帮助，为改进这本书提出了无数的建议，他还赞同出现在书中的许多关于亚原子粒子的讨论。安·玛丽·殷博诺尼 (Ann-Marie Imbornoni)，再一次在各个阶段都顺利地运作着这本书。我非常高兴丽兹·凯西 (Liz Casey) 又一次对原稿进行了高超的编辑，不仅大大地改进了标点、句法和语法，还使表述更加清晰，并确保所用的那些文字传达出了我的意图。

感谢甘佩西·默非 (Ganpathy Murthy) 教授 (肯塔基大学) 和布拉尼斯拉夫·乔志伟 (Branislav Djordjevic) (乔治梅森大学) 经过深思熟虑后给出的建议。我特别要感谢宾夕法尼亚大学的菲尔·尼尔森 (Phil Nelson)，他对书中的许多部

① 网易公开课可免费观看全课程双语字幕视频。——编辑注

分进行了细致、深刻地评议。

本书的写作开始于一年前，2015 年 8 月在阿斯潘物理中心（ACP）完成。非常感谢 ACP 提供的氛围，在那里，作为一名科学家和作者，我感受到了自己在智慧上被给予的滋养。ACP 由国家自然科学基金（NSF）1066293 项目资助。

本书的大部分内容是在位于圣塔巴巴的卡弗里理论物理研究所（KITP）写作的，在那里我荣幸地得到了 2014 年秋季的西蒙杰出访问学者奖励。KITP 由国家自然科学基金 NSF PHY11-25915 项目给予部分资助。我特别要感谢拉尔斯·比尔德斯登（Lars Bildsten）教授使这成为可能。

我发现自己不能在这两个奇妙之地写书的那天，就是我的改行之日。

巴里·布莱德林（Barry Bradlyn）和阿列克谢·什卡林（Alexey Shkarin）是两名优秀的研究生，他们校读了本书，找出了其中的漏洞并且对体裁的变化提出了建议。

我的三代之家一如既往地支持着我。最终的检查是斯特拉（Stella）做的，她自作主张地用铅笔在页边空白处及正文留下了许多注释，书中剩余的错误都该由她负责。

R. Shankar

中文版序

译者的话

前 言

第 1 章 静电学 I	1
1.1 回顾 $F=ma$	1
1.2 走进电学	3
1.3 库仑定律	6
1.4 电荷的性质	7
1.5 库仑定律的验证	9
1.6 引力与电力之比	11
1.7 库仑定律对连续带电体的应用	12
第 2 章 电场	14
2.1 重要内容回顾	14
2.2 离题说说核力	15
2.3 电场 E	16
2.4 场的图示	18
2.5 偶极子的场	24
2.6 对场的响应	27
第 3 章 高斯定理 I	30
3.1 无限长带电直线的场	30
3.2 无限大带电平面的场	34
3.3 球形电荷分布：高斯定理	37
3.4 关于面积元矢量 $d\mathbf{A}$ 的插言	38
3.5 图说高斯定理	42
第 4 章 高斯定理 II：应用	47
4.1 高斯定理的应用	47
4.2 球壳内部的场	50
4.3 无限长带电直线的场，再解	52

4.4	无限大带电平面的场, 再解	53
4.5	导体	54
第5章	库仑势	59
5.1	保守力与势能	60
5.2	静电场是保守的吗?	64
5.3	图解场的线积分不依赖于路径	66
5.4	偶极子的电场和电势	68
第6章	导体与电容器	71
6.1	利用 E 计算 V 更简单的例子	72
6.2	V 的图示	73
6.3	等势	75
6.4	镜像法	76
6.5	电容器	82
6.6	储存于电容器中的能量	84
6.7	电荷系的能量	84
第7章	电路与电流	87
7.1	电场的能量	87
7.2	电路与电导率	88
7.3	电路	92
7.4	电池与电动势 $\mathcal{E}$	95
7.5	有电源的 RC 回路	98
7.6	串联和并联电路	101
第8章	磁学 I	104
8.1	显示磁现象的实验	104
8.2	洛伦兹力举例 回旋加速器	107
8.3	载流导线受到的磁力	110
8.4	磁矩	113
8.5	直流电机	114
第9章	磁学 II: 毕奥-萨伐尔定律	116
9.1	毕奥-萨伐尔定律的应用: 圆电流的磁场	117
9.2	条形磁铁的微观描述	119
9.3	无限长载流直导线的磁场	121
9.4	安培环路定理	123
9.5	麦克斯韦方程组 (静态)	127
第10章	安培环路定理 II、法拉第定律和楞次定律	128
10.1	无限长载流直导线的磁场, 再解	128

10.2	通电螺线管的磁场	131
10.3	法拉第定律和楞次定律	134
10.4	法拉第定律的选学内容	142
第 11 章	法拉第定律进阶	147
11.1	电子感应加速器	147
11.2	发电机	150
11.3	电感	153
11.4	互感	154
11.5	自感	156
11.6	磁场的能量	158
第 12 章	AC 电路	160
12.1	回顾电感器	160
12.2	LC 电路	164
12.3	LCR 电路	167
12.4	欧姆定律的复数形式	173
第 13 章	LCR 电路和位移电流	176
13.1	LCR 结果的分析	177
13.2	复数的威力	182
13.3	位移电流	185
第 14 章	电磁波	188
14.1	波动方程	190
14.2	真空中特定条件下的麦克斯韦方程组	193
14.3	波	196
14.4	波动方程的正弦解	198
14.5	电磁波的能量	202
14.6	电磁波的起源	203
14.7	麦克斯韦方程组——一般情况（选学）	204
14.8	从微观到宏观（选学）	209
第 15 章	电磁学和相对论	214
15.1	从库仑定律和相对论推出磁学	214
15.2	电动力学的相对论不变性	217
15.3	洛伦兹变换回顾	218
15.4	标量场和矢量场	221
15.5	微分算符	223
15.6	洛伦兹标量和矢量	225
15.7	四维电流密度 J	226

15.8	四维势 A	228
15.9	四维矢量 A 的波动方程	231
15.10	电磁张量 $\mathcal{F}$	234
第 16 章	光学 I: 几何光学回顾	240
16.1	几何光学 (光线光学)	240
16.2	c 的简史	241
16.3	几何光学的若干亮点	243
16.4	从费马原理推导反射定律	244
16.5	从费马原理推导斯涅尔定律	246
16.6	从费马原理推导曲面上的反射	247
16.7	椭圆面镜和费马原理	249
16.8	抛物面镜	251
第 17 章	光学 II: 更多的反射镜和透镜	253
17.1	抛物面镜的球形近似	253
17.2	成像: 几何光学	254
17.3	由费马原理成像	256
17.4	复杂情况	259
17.5	从费马原理求解透镜	262
17.6	最小作用量原理	263
17.7	眼睛	265
第 18 章	光的波动理论	268
18.1	波的干涉	270
18.2	应用实数进行波的叠加	272
18.3	应用复数进行波的叠加	273
18.4	干涉分析	275
18.5	衍射光栅	279
18.6	单缝衍射	281
18.7	理解反射和晶体衍射	282
18.8	光入射到油膜上	283
第 19 章	量子力学: 主要实验	287
19.1	光的双缝实验	287
19.2	麦克斯韦所遇到的问题	288
19.3	关于光子的题外话	291
19.4	物质波	293
19.5	光子与电子	296
19.6	海森伯不确定关系	298

19.7	让问题变清晰	302
19.8	波函数 ψ	306
19.9	波函数塌缩	308
19.10	总结	308
第 20 章	波函数及其诠释	311
20.1	经典力学与量子力学中的概率	313
20.2	了解 ψ	317
20.3	统计学概念：平均值和不确定性	320
第 21 章	量子化与测量	323
21.1	动量态	324
21.2	动量的单值性和量子化	325
21.3	测量假设：动量	329
21.4	通过计算求得 $A(p)$	337
21.5	傅里叶定理	341
21.6	测量假设：一般情况	345
21.7	多个变量	345
第 22 章	能量定态	347
22.1	环上的自由粒子	350
22.2	势箱问题	355
22.3	势箱中的能量测量	365
第 23 章	散射和动力学	367
23.1	量子散射	367
23.2	隧穿效应	372
23.3	量子动力学	373
23.4	直积解的特性	377
23.5	时间演化的通解	379
第 24 章	总结与展望	385
24.1	假设：第一步	385
24.2	改进假设	387
24.3	假设：最终形式	394
24.4	多粒子情形：玻色子与费米子	395
24.5	能量-时间的不确定关系	402
24.6	下一步？	407

静电学 I

在本课程第二部分的开始，我们引入一种新的力——电磁力；随后，我们将学习光学；最终，以量子力学结束这门课程。其实，量子力学并不是转向到一种新的力，它完全是另外一回事儿。它研究的不是什么力确定了物体的运动轨道，而是我们到底该不该认为粒子具有运动轨道。答案是否定的。你会发现它颠覆了牛顿力学的许多核心思想。但是，有个好消息，这就是只在研究非常小的东西时，如分子或者原子，才需要用到量子力学。当然，关键的问题是分界线在哪里？多小才算是小？有些人甚至问我：“是否要用量子力学来描述人的大脑呢？”答案是：“是的，如果它足够小。”我参加过一些聚会，与某个人交谈了几分钟后，我认为：“是的，对待这个人的脑袋，需要使用完备的量子力学。”但是，在大部分时间里，一切都是宏观的，所以你可以用牛顿力学和经典电磁学来进行研究。

1.1 回顾 $F=ma$

在开始学习电磁学之前，我们来回顾一下力、质量、加速度之间的关系，还要复习 $F=ma$ ，在前一本书中，也就是第 I 卷中，已经对此进行了详尽的讨论。所有人从一开始就知道 a 表示加速度，并且都知道该如何测量它。你测得现在的位置和稍后某个时刻的位置，计算两者之差，用它除以时间间隔，就得到了速度。尽管速度需要连续测定两个位置，但是我们却说“此刻”的速度，因为可以让这两次测量无限地接近，在时间间隔趋近于零的极限下，我们就有了此刻的速度。如果你汽车上的速度表指示的是 60 mile/h，这是你此刻的速度。同理，求出现在的速度和稍后时刻的速度，用它们的差值除以时间间隔，就得到了加速度，它是瞬时量。如果你踩油门并且感受到了座椅的推力，那么这反映出你此刻具有加速度。

假设我们知道了测量加速度的方法，又应该怎样确定物体的质量呢？首先，我们需要任选一个标准质量。在标准局中存有一个由某种材料制成的物块，将之定义为 1kg。利用它，你能够给出其他的质量吗？你一定知道，用秤来称量是不成的，因为那测量出的是物体受到的重力，它源于地球的引力。而无论在何处，即便是在远离地球的地方，都可以对物体的质量进行定义。你或许会说，“那好，用一个已

知的力除以它产生的加速度”，但是，我们也还没有谈到如何对力进行测量。因为你只有 $F=ma$ 这一个方程。

有个正确的选择是这样来应用 $F=ma$ 。找一根弹簧，将其一端固定于墙上，在其另外一端挂上一个已知质量为 1kg 的物体。拉这个物体，使弹簧伸长一定的量，之后释放这个物体，测量其加速度 a_1 。现在，取一个待测质量的物体，比如说是一头大象。你把这个 1kg 的物体拿下来，换上这头大象，将弹簧拉伸同样的长度，测量这头大象的加速度 a_E 。由于弹簧的伸长量相同，所以这两种情况下的弹力是相同的。你不知道也不必知道弹力是多大，只要知道是相同的就好。于是，我们得到

$$1 \cdot a_1 = m_E \cdot a_E \quad (1.1)$$

由这个方程就可以确定出大象的质量 m_E 。

假设利用这样的过程确定出了所有物体的质量，那么我们是否就可以利用 $F=ma$ 得到这些物体的运动轨道了呢？不行，我们还需要了解在各种情况下，都有哪些力作用于物体之上。我们需要明确在给定的情形下 $F=ma$ 中的力 F 。一般来说，牛顿并没有告诉你这些。例如，对于弹簧，你必须明确，当它被拉伸时，作用力有多大。为此，你将一个已知质量的物体系在弹簧上，使弹簧的伸长量为 x ，找到物体的加速度，这样乘积 ma 就可以给出这个力随 x 变化的函数关系。然而，牛顿的确针对一个著名的案例给出了方程的左侧，这就是质量 M 和 m 间的万有引力，它与两者的间距 r 及引力常数 G 之间的关系为

$$F = \frac{GMm}{r^2} \quad (1.2)$$

根据这个定律，我们可以进行一些很了不起的天体力学研究，这项研究一直持续到了今天。

与弹簧不同，地球与它吸引的那个物体实际上并没有相互接触，无论它是苹果还是月亮。这是个远程作用的例子。相信没有接触的物体之间可以发生相互作用是一种非常伟大的抽象，如彼此吸引（或排斥）。在这种力中，第一个被定量表达出来且公开发表的就是引力。

要记住 $F=ma$ 和 $F=-kx$ 之间的不同。前者是普适的，将力与力产生的加速度联系在一起，但是它并没有给出在某个情形下会存在什么样的力。我们每次都要找出作用在物体上的各个力。如果物体被系在一根弹簧上，我们就必须对弹簧进行实验研究，进而得到 $F=-kx$ 。

总之，利用 $F=ma$ 能够完成三件事：定义质量、通过检测已知质量物体的加速度确定力和求出在已知力作用下物体的加速度。

每当物体加速运动时，我们必定可以将其加速度与作用在其上的各个力的合力联系在一起。但是，有时我们却发现它不能成立。我们可以放弃 $F=ma$ ，或者坚信 $F=ma$ 是正确的，但要在所有力都被考虑在内的条件下才成立，进而去发现这种不

相符所揭示出的未知力及其性质。

1.2 走进电学

现在，我将讲述一个实验，它揭示出一个新力的存在。我找一把梳子，使劲儿地梳自己的头发，然后让它接近一个小纸片。我发现小纸片被粘在了梳子上，而且我可以将小纸片提起来。可是，一旦我用力地甩动梳子，小纸片就掉下去了。我们可以从这个实验中知道些什么呢？

很明显，梳子与纸片之间的力不是引力，因为引力与你梳不梳头发没有关系。我们可以认为出现了一个新的力。但是，我们或许会认为这个力比引力小很多，因为一旦甩动梳子，纸片就最终屈服于引力而掉落下去。要是这样想，你可就错了。事实上，在某种标准下，这个新力是引力的 10^{40} 倍，稍后我会对此进行解释。但是在开始阶段，我们还是直观地了解一下吧。

在图 1.1 中，你看到我拎着一把梳子，梳子提着那纸片。是谁在试图向下拽纸片呢？是整个地球！喜马拉雅在将它向下拉，太平洋在将它向下拉，甚至尼斯湖的怪兽也在将它向下拉。所有的东西都在把它往下拉。有些人通常认为这个世界施予他们的是阻力，我就是其中之一。但是，我这一次的想法是对的。所有东西都在对抗我和我的梳子，而我们却能够克服所有这些。这就是你比较电力和引力的办法。我搞出来的梳子和纸片儿之间的那点电力，需要整个地球来进行抵消。后面我们将看到 10^{40} 这个值与此事实定量相符。

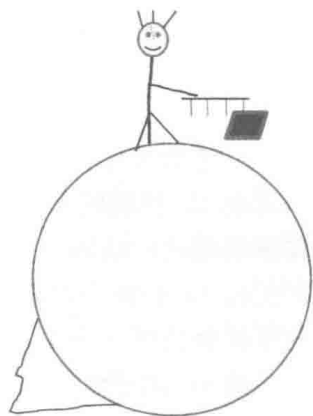


图 1.1 梳子对纸片施以静电吸引，而全世界对纸片施以反向的引力。

当我用梳子摩擦头发时，梳子发生了一些变化，使得它可以吸起纸片。我们这样描述梳子的状况：“梳子带电了。”如果将梳子在水中沾一下再拿出来，就会发现它不能吸引纸片了。我们说这把梳子被放电了。

我将详细地讲述相应的微观理论，它可以定性和定量地解释这个以及更多的实验。但是，我们首先在定性的层次上，再看几个类似的实验（见图 1.2）并用这些思想来进行解释。

实验 1：戴上丝绸手套，拿起一根铝棒，在飞奔而过的带有毛皮的动物身上蹭一下，比如说在夜帝[○]身上蹭一下。然后，使铝棒与一个孤立的金属球短暂地接触一下。结果这根棒和球将会相斥。

实验 2：用那根带电棒靠近一个孤立不带电的球。在接触之前，它们会彼此相

[○] 传说中在喜马拉雅山区出现的全身长毛的大雪怪。——译者注