

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

趣味物理学 (续编)



内容提要

这本书的性质跟《趣味物理学》相同，著者从日常生活里、技术方面、自然界里、科学幻想小说里收集了许多和物理学有关的问题，作了详细的分析和讨论，目的是要使读者能够灵活地运用学到的物理学知识。内容牵涉到物理学的各方面，包括力学基本定律、力和功、圆周运动、万有引力、液体和气体的性质，以及热、磁、电、光、声各种现象。

原书第十三版著者序言摘要

这是一本独立的书，并不是直接继续《趣味物理学》前编写下来的。前编的成功，鼓励著者整理剩下的资料，写成了这本续编，或者更确切些说，写成了另一本同样谈到物理学的书。

著者在这本书里也同前一本一样，与其说是要告诉读者一些新的知识，不如说是要使读者能够灵活地运用一些已经知道的简单的物理学知识。这本书的目的是要启发读者的科学想象力，使他们养成用物理学的精神来思考，并且善于多方面地应用自己知识的习惯。因此，在《趣味物理学》里，我们把有效实验的叙述放在第二位；而把物理学上的一些难题、有趣的题目、值得研究的怪现象、复杂的问题以及出人意料的物理现象等等，放在第一位。书里的这些材料，都是从日常生活、技术范围、自然界、科学幻想小说里收集来的。

一般地说，这本书在取材方面，同《趣味物理学》前编比较，是拿比较有基础的读者做对象的，不过在这方面，两本书的区别也不大，读者可以随便先读哪一本。

雅·别莱利曼

目 次

第一章力学的基本定律.....1	1
最便宜的旅行法(1)“地球,停下来!”(3)从飞机上送信(6)投弹(8)	
不要停车的铁道(8)活动人行道(11)一条难懂的定律(12)大力士斯维	
雅托哥尔怎样死的?(14)没有支持的东西能够运动吗?(15)火箭为	
什么会飞?(16)乌贼是怎样活动的?(19)乘火箭到星球上去(20)	
第二章力·功·摩擦.....23	23
关于天鹅、龙虾和梭鱼的问题(23)和克雷洛夫的看法相反(25)蛋壳容	
易破碎吗?(28)帆船逆风前进(30)阿基米德能举起地球吗?(32)儒	
勒·凡尔纳的大力士和欧拉的公式(34)结为什么能打得牢?(37)假如	
没有了摩擦(38)“切留斯金”号失事的物理原因(40)自己会平衡的	
木棒(43)	
第三章圆周运动.....46	46
陀螺旋转的时候为什么不会倒?(46)魔术(48)哥伦布的问题的新解	
决(49)重量“消失”了(51)你也可以做伽利略(53)我们两人之间的争	
论(55)争论结束了(57)在“魔”球里(57)液体做的望远镜(62)“魔环”	
(63)杂技场里的数学(64)重量的短少(67)	
第四章万有引力.....69	69
引力大不大?(69)从地球到太阳的一条钢绳(72)能不能躲开万有引	
力?(73)威尔斯小说里的主角是怎样飞上月球的?(75)月球上的半	
小时(76)在月球上打靶(78)无底洞(80)童话里的道路(82)怎样挖掘	
隧道?(85)	
第五章乘着炮弹旅行.....87	87
牛顿山(87)幻想的大炮(89)沉重的帽子(90)怎样减轻震动?(91)你	
想自己来算一算吗?(93)	
第六章液体和气体的性质.....95	95
不会淹死人的海(95)破冰船是怎样工作的?(98)船沉下去沉到哪	
儿?(100)怎样实现儒勒·凡尔纳和威尔斯的幻想?(103)“萨特阔”	
号是怎样打捞起来的?(106)水力“永动机”(108)好象是一个简单的	
问题(111)关于水槽的问题(112)奇异的容器(114)空气的压力(116)	
新式的希罗喷泉(119)戏弄人的容器(122)水在底朝天的玻璃杯里有	
多重?(123)轮船为什么会互相吸引?(124)柏努利原理和它的效果	
(128)鱼鳔是做什么用的?(131)波浪和旋风(133)在地心里旅行(138)	
幻想和数学(140)在深矿井里(143)乘平流层气球上升(145)	
第七章热的现象.....148	148
扇子(148)有风的时候为什么更冷?(149)沙漠的热风(150)面纱能	
不能保温?(151)冷水瓶(151)不用冰的“冰箱”(153)我们受得住多	
高的热?(153)是温度计还是气压计?(155)煤油灯上的玻璃罩是做	
什么用的?(156)为什么火焰自己不会熄灭?(157)儒勒·凡尔纳小	
说里漏写的一段(158)在没有重量的厨房里做早餐(159)为什么水会	
浇灭火?(164)怎样用火来熄灭火?(164)能不能用沸水把水烧开?	
(167)能不能用雪来烧沸水?(169)“气压计汤”(170)沸水永远是烫	
的吗?(173)烫手的冰(175)用煤来取冷(176)“饮水小鸭”(177)	
第八章磁和电.....180	180

“慈石”(180)关于指南针的问题(181)磁力线(182)怎样使钢磁化？(184)庞大的电磁铁(185)磁力魔术(187)电磁铁在农业上的用途(189)磁力飞机(189)同“穆罕默德的棺材”一样(191)电磁运输器(193)火星人和地球上的人交战(196)表和磁(197)磁力“永动机”(199)博物馆里的问题(200)电线上的飞鸟(201)在闪电光下(202)闪电值多少钱？(203)屋子里的雷雨(205)

第九章光的反射和折射·视觉.....207

五像照片(207)日光发动机和日光加热器(208)隐身帽(210)隐身人(212)隐身人的威力(215)透明的标本(216)隐身人能看见别人吗？(218)保护色(219)自卫色(221)人的眼睛在水底下(222)潜水员是怎样看东西的？(224)透镜在水底下(224)没有经验的游泳者(225)看不见的别针(228)从水底下看世界(230)深水里的颜色(236)我们眼睛里的盲点(237)月亮在我们眼里有多大？(240)天体的视大小(243)天蛾(247)为什么显微镜能够放大？(250)视觉上的错觉(254)服装和错觉(255)哪个更大？(255)想象的力量(256)再谈视错觉(258)这是什么？(261)奇怪的车轮(262)技术上的“时间显微镜”(265)尼普科夫圆盘(268)兔子为什么斜着眼看东西？(269)为什么在黑暗中所有的猫都是灰色的？(271)

第十章声音·波动.....273

声波和无线电波(273)声音和枪弹(273)假爆裂(274)一件幸运的事(276)最慢的谈话(277)声云和空气回声(278)听不见的声音(279)超声波在技术上的应用(281)小人国居民的声音和格列佛的声音(283)什么人每天可以收到两天的日报？(284)火车上的汽笛声问题(285)多普勒现象(287)一笔罚金的故事(288)用声音的速度走路(290)

第一章力学的基本定律

最便宜的旅行法

十七世纪，法国有一位作家西拉诺·德·别尔热拉克，写了一本讽刺小说，名叫《月国史话》（1652年），里面有一处谈到一件好象他本人曾经亲身经历过的奇事。有一次他做物理实验，竟莫名其妙地和他的玻璃瓶一起升到了空中。过了几小时，他才得重新降落到地面上。这时候可真叫他惊奇，他发觉自己已经不在本国法兰西，甚至也不在欧洲，却在北美洲的加拿大了！但是，这位法国作家对于自己这次出乎意外的横跨大西洋的飞行，却认为是完全自然的。他解释的理由是：在一个不由自主的旅行家离开地球表面的时候，我们这行星还是和从前一样在从西向东转；因此，他降落的时候，在自己的脚下已经不是法兰西，而是美洲大陆了。

看来，这是多么便宜而且简单的一种旅行方法啊！只要升到地球上空，哪怕只停留几分钟，就可以降落到西方很远的地方。用不着越洋过海、爬山渡河去做疲劳的旅行，只要悬在地球上空静静地等着，到时候，地球自己就会把目的地送到旅行家的脚下。

可惜这种奇异的方法，不过是一个幻想。首先，我们上升到空中以

后，事实上并没有和地球脱离关系：我们仍然和它的大气外壳保持着联系，我们只是悬在那随着地球的自转而运动的地球大气里。空气，尤其是比较密实的下层空气，是带着在它里面的一切，象云、飞机、各种飞鸟和昆虫等等，跟着地球一起转的。假使空气不跟着地球转的话，那末我们站在地球上就会经常觉得有大风了，并且这种风非常强烈，就是最猛烈的飓风也比它柔和。要知道，我们站着不动，让空气在我们身旁流过，或者反过来，空气不动，我们在空气里前进，是完全一样的；在这两种情况下，我们同样会感觉到有很大的风。摩托车运动员用每小时100公里的速度开着车子前进，即使在完全没有风的天气，他也要觉得有很大的逆风。

这是第一。第二，就算我们能够升到大气的高层，或者就算地球外面没有这层空气外壳，这时候，这位法兰西讽刺小说家幻想出来的便宜旅行法，还是不切实用的。事实上，我们离开那旋转着的地球的表面以后，由于惯性的关系，还是依照原来的速度继续运动着；也就是说，我们还是用那在我们下边运动着的地球的速度继续运动着。所以在我们重新降落的时候，我们还是降落在原先出发的地方，就同我们在跑得飞快的火车里面向上跳，仍旧落在原处一样。不错，惯性会使我们沿着切线做直线运动，而我们脚下的地球却做着弧线运动；可是在极短的时间里，这是没有什么关系的。

“地球，停下来！”

英国作家威尔斯有过一篇幻想小说，谈到某一位办事员怎样创造奇迹。这个不大聪明的年轻人生来有一种奇特的本领，只要说出他想要什么，这种东西就会立刻出现。可是这种奇特的本领除了给他本人和别人带来不愉快以外，却什么好处也没有。读一下这个故事的结尾，对我们是有教育意义的。

在一次很长的夜宴完毕以后，这个奇异的办事员生怕到家的时候天已经亮了，就想使用自己的天赋才能，把黑夜延长一下。怎么办呢？应该命令所有的天体停止运动。这个奇人没有立刻决定做这件不太平凡的事情，但是他的朋友却怂恿他叫月亮停止运动。这时候，他就看着月亮，沉思地说：

“叫月亮停住，我觉得它离我们太远了，……你以为怎样？”

美迪格却竭力劝他，“可是为什么不试一试呢？它当然不会停住，你只要叫地球停止转动就得了。我想，这大概对谁也不会有什么坏处吧！”

“唔，”福铁林说，“好，就让我来试一试。”

于是他就做出发命令的姿势，伸出双手严肃地喊道：

“地球，停下来！不准再转！”

这句话还没有说完，他跟朋友们却已经用一分钟几十英里的速度飞入空中去了。

虽是这样，他还能继续思索。幸亏不到一秒钟，他就想出并且说出了一个新的愿望，那是关于他自己的：

“无论怎么样，得让我活下去，别遭殃才好！”

不能不说他这个愿望提出得正是时候。几秒钟以后，他发现自己已经落在—处好象刚爆炸过的地面上，在他的周围，石块、倒坍的建筑物
的碎片、各种金属制品接连不断地飞过去，幸亏都没有撞到他身上；飞过去的一条遭难的牛，落在地面上给撞得粉身碎骨。风用惊人的威力呼啸着；甚至使他不能抬起头来环顾周围的一切。

他用断续的声音高叫着：“真是莫名其妙，出了什么事啊？怎么会发起狂风来了呢？总该不是因为我做了什么事惹起来的吧。”

他在狂风里透过飘动着的衣襟的缝隙尽力向四周望了望以后，继续说道：

“天上似乎一切都还有秩序。月亮也在原处。可是所有别的呢……城市哪里去了？房屋和街道哪里去了？这风是从哪儿来的？我并没有呼风啊。”

福铁林试着要站起来，然而已完全不可能了，因此他就双手抓住石块和土堆向前爬。可是已经没有地方可去了，因为他从被风吹得蒙在头上的衣襟缝里尽力望出去，只见周围已经是一片废墟。

“宇宙间一定有什么东西遭到严重破坏了，”他想，“可是究竟是什么呢，却一点也不知道。”

事实上是什么都毁了。房屋没有了，树木没有了，任何生物没有了——什么都不见了。只有乱七八糟的废墟和各种各样的碎片四散在他附近，在尘埃蔽天的狂风里勉强能看清它们的轮廓。

这个祸首当然一点也不明白这是怎么回事。可是这件事情的解释却非常简单。叫地球一下子停止转动，他没有想到还有惯性作用，惯性作用在圆周运动猛一停止的时候，不可避免地要把地面上的一切抛出去。这就是为什么房屋、人、树木、牲畜——一切跟地球本身没有固定联系的东西，都要沿着地面的一条切线，用枪弹般的速度飞出去。后来一切都落到地面上，就被撞得粉碎了。

可是福铁林也知道他造成的奇迹并不特别成功。因此，他对于奇迹发生了很深的厌恶，打算下决心不再创造什么奇迹了。可是，首先得把已经造成的灾害挽救一下。这场灾害也真不小。狂风刮得很凶，尘土象云一样遮蔽了月亮，远远还听见有洪水逼来的响声；他在闪电的光辉下，还看到了一堵水墙，正在用惊人的速度向他躺着的地方冲来。

这时候他才下了决心，对着水高声喊叫：

“站住！一步也不许再前进！”然后又向雷、电和风，发出了同样的命令。

一切都平静了。

他于是蹲下来想。

“最好再也别闹这种乱子了，”他想过以后，说道：“第一，我就要说的几句话都应验了以后，让我失掉创造奇迹的能力吧，从今以后我要做个普通人了。奇迹是不需要的。这玩意儿太危险了。第二，让城市、人们、房屋和我自己，一切都恢复原来的样子。”

从飞机上送信

设想你是在一架很快地在空中飞着的飞机里。下面是熟地方。现在

你就要飞过你朋友的住宅了。你突然想起，“最好能问候他一下。”于是你很快在便条纸上写了几个字，把纸缚在一块石头上，等飞机刚飞到这所住宅上空的时候，让石头落下去。

当然，你满怀信心地认为这块石头会落在你那朋友的院子里。可是，虽然院子和住宅正在你下面，石头却并不往那里落！

如果留心看着这块石头从飞机上往下落，你就会看到一种奇怪的现象：石头在往下落，可是同时却仍旧在飞机下面，它好象顺着缚在飞机上的一条看不见的线在向下滑一样。这样，等石头到达地面的时候，它要落在离你瞄准的地方很远的前方了。

这里出现的还是那个妨碍着我们使用别尔热拉克建议的吸引人的旅行方法的惯性定律。当石头还在飞机里的时候，它是同飞机一起前进的。你让它落下去，可是在它离开飞机往下落的时候，并没有失掉原来的速度，因此，在它落下的同时，它还要向原来的方向继续前进。两种运动，一种是竖直的，一种是水平的，合了起来，——结果，这块石头就始终留在飞机下面，沿着一条曲线往下飞（当然这只是在飞机本身并不改变飞行方向和速度的情况下）。这块石头的飞行，实际上就象按水平方向抛出去的物体，例如从一枝水平的枪射出去的枪弹，它走的路线总是一条弧线，最后到达地面。

不过需要指出，如果没有空气的阻力，上面所说的一切，当然是完全正确的。但是事实上，空气的阻力阻碍着石头的竖直运动和水平运动。因此，石头不会总是正在飞机下面，而要稍微落在它后面一些。

如果飞机飞得很高很快，石头偏离竖直线会很显著。在没有风的天气，飞机在 1000 米的高空用每小时 100 公里的速度飞行，从飞机上落下来的石头，一定会落在竖直落下地点的前面大约 400 米的地方（图 2）。

如果不把空气的阻力计算在内，这个计算并不复杂。由匀加速运动的公式

$$S = \frac{1}{2}gt^2, \text{ 得 } \tau = \sqrt{\frac{2S}{g}}. \text{ 可知石头从1000米的高处落地的时间, 应当是 } \sqrt{\frac{2 \times 1000}{g}} \text{ 也就是14秒。在这个时间里, 它用100公里/小时也就是 } \frac{100,000}{3600} \text{ 米/秒的速在水平方向的移动是 } \frac{100,000}{3600} \times 14 = 390 \text{ 米}$$

投弹

从上面说的看来，空军里的投弹手要把炸弹投在指定的地方，真是多么困难：他得考虑飞机的速度，考虑炸弹在空气里落下的条件，除此以外，还要考虑到风的速度。图 3 上画的是飞机投下的炸弹在各种条件下所走的不同路径。如果没有风，投下的炸弹就沿曲线 AF 飞行，理由上面已经讲过了。顺风的时候，炸弹要被吹向前面，沿曲线 AG 走。在不大的逆风里，如果上下层大气的风向是一样的，炸弹就要沿曲线 AD 落下；要是象平常那样，下层的风向同上层的相反（上层是逆风，下层是顺风），

那末，炸弹落下的曲线就要变成 AE 了。

不要停车的铁道

如果你站在火车站的不动的月台上，有一列快车打月台旁边开过，这时候你要跳上车去，当然是不很容易的。可是请你想象一下：如果你脚下的月台也在移动，并且移动的速度和方向同火车一样，这时候你要上车还有困难吗？

一点困难也没有了。这时候你走上火车，就象走上一辆停着的火车一样平稳。只要你和火车是在同一个方向用同样的速度前进，那末对你来说，火车就等于是完全不动的。不错，车轮是在转，但是你会觉得它们是在老地方转。严格说来，我们通常看做不动的东西（例如停在火车站上的火车），都和我们一起绕着地球的轴同时又绕着太阳在转。可是在实际上，我们一点儿也没有理会到这些运动，并且这些运动对我们也一点儿没有妨碍。

所以，我们完全可能建造出这样的火车站，使火车经过它的时候不停下来，仍旧照原来的速度开，而旅客们还是可以上车下车。

在展览会里往往采用这类设备，好让参观的人能够很快很方便地欣赏陈列在广大会场里的陈列品。会场两头的广场，用一条象无限轨道那样的铁道连在一起；参观的人可以在火车很快地开过的时候，随时随地上车下车。

这种有趣的构造见附图。在图 4 上，A 和 B 是会场两头的车站。在每个车站上，中间都有一块圆的不动的场子，场子的外圈围着一个大转盘。转盘外围有一圈链索，一节节的车厢可以挂在这链索上。现在让我们看转盘转动时候的情况。车厢绕着转盘开动的速度，同转盘外缘的速度一样；因此，人们可以毫无危险地从转盘走上或离开车厢。下车以后，参观的人就可以向转盘的中心走去，一直走到那块不动的场子上。从转盘的内缘跨上那块不动的地方已经没有困难了：因为在这里，圆的半径已经很小，所以它的圆周速度也就极小。到达里面那块不动的场子以后，参观的人就可以过桥走出车站去。

火车不常停，可以节省许多时间和能量。举例来说，城市里的电车，大部分时间和差不多三分之二的能量是消耗在电车离站时候的逐渐加快的运动，和停车前的逐渐减慢的运动上的。

火车站上即使不用特别的活动月台，也可以使旅客在火车开着的时候上车和下车。让我们来设想，有一列快车打一个普通的不动的车站上开过；我们希望它不停下来就在这里让旅客搭上车。可以让旅客先跳上停在并行轨道上的另一列火车里，开动这列火车，让它前进，渐渐把速度提高到跟快车一样。在两列火车并排前进的时候，就这两列车相互之间的关系说来，它们都好象停着不动。这时候，只要搭上跳板，把两列火车的车厢接起来，旅客们就可以从辅助车厢安稳地走上快车。这样一来，列车到站就不用停车了。

活动人行道

还有一种设备，也是根据这种相对运动的原理建造的，就是所谓“活动人行道”；不过这种设备直到目前为止，也还只有在展览会里可以看到。

这种设备的构造如图 6。你看，这里有五条环形的人行道，一条挨着一条套在一起；它们各有单独的机械来开动，速度各不相同。最外圈的那一条走得相当慢，速度只有每小时 5 公里，等于平常步行的速度，要走上这样慢慢爬行的人行道，显然并不困难。在这条里侧，同它并行的第二条人行道，速度是每小时 10 公里。如果从不动的街道直接跳上第二条人行道，当然是危险的，可是从第一条跨到这一条就不算什么了。事实上，对速度每小时 5 公里的第一条人行道来说，速度每小时 10 公里的第二条人行道也不过是在做每小时 5 公里的运动；这就是说，从第一条跨到第二条，是和从地面跨到第一条一样容易的。第三条已经是用每小时 15 公里的速度前进了，可是从第二条跨上去，当然也不困难。从第三条跨到用每小时 20 公里的速度前进的第四条，以及最后从第四条跨到用每小时 25 公里的速度奔驰的第五条，也都一样容易。这第五条人行道就可以把旅客送到要去的地方；到了目的地，旅客又可以一条条地往外跨，他就可以走到不动的地面上。

一条难懂的定律

力学的三条基本定律里，大概要算第三条所谓作用和反作用定律最使人疑惑不解了。大家都知道这条定律，甚至在某种情况下也会正确地应用它，可是很少有人能够完全明了它的意义。读者当中也许有人是一下子就懂得它的，——可是我得承认，我从初次和它相识起，过了十年，才完全理解它。

我曾经和许多人讨论过这条定律，也曾经不止一次地看出，人们对这条定律的正确性的承认，都是有保留的。他们认为，这条定律对静止的物体说来，毫无疑问是正确的，但是不懂得怎样把它应用到运动物体的相互作用上……这条定律说，作用永远等于方向相反的反作用，这就是说，如果马拉车子，那末车子也用同样大的力量往后拉马。可是这时候车子就应该停在原来地方不动才对，为什么它还是向前走呢？这两个力量如果是相等的，为什么它们不互相抵消呢？

一般人对于这条定律的怀疑就是这样。那末，这条定律是不可靠的吗？不，定律毫无疑问是可靠的；不过我们没有正确地理解它。两个力没有互相抵消掉，只是因为它们是加在不同物体上的缘故：一个力加在车上，一个力加在马上。两个力是一样大，没有错，——可是，难道说一样大的力永远会产生一样大的作用吗？难道说一样大的力能够使随便什么物体得到一样大的加速度吗？难道说，力对物体的作用是和物体本身，和物体的“抵抗力”的大小没有关系的吗？

如果想到了这些，那末，车子虽然在用同样大小的力量向后拉马，而马还能拉着车走的原因就很容易明白了。作用在车子上的力和作用在马身上的力在每一瞬间都是相等的；但是，车有轮子，可以自由移动位置，而马却坚定地立足在地面上，因此，车子只好跟着马走。可以再想一想，如果车对马的动力不起反作用，那末，……不用马也就行了，用

一个极小的力量也就能拉着车走了。可是事实上，要克服车的反作用，还是非马不可。

如果把这条定律的通常所用的简短形式“作用等于反作用”改成譬如说“作用力等于反作用力”，那末也许能使大家更容易理解，也少产生些疑问。因为这里相等的只是力。至于作用（如果象平常那样，把“力的作用”理解成物体的位置移动），因为受力的物体不同，一般是不会相等的。

当北极的冰紧挤住“切留斯金”号船身的时候，它的舷也同样用相等的力压在冰上。至于发生惨剧，那是因为强大的冰块抵住了船壳的压力，没有被压碎；可是船身呢，虽然是钢做的，却不是实心的，所以经受不住这种压力，到底被冰压坏了。

物体落下的时候，当然也服从作用等于反作用的定律，虽然这两方面的力不是一下子就看得出来的。苹果落到地上，是因为地球在吸引它；可是苹果也在用完全相等的力吸引地球。严格地说，苹果和地球是在彼此相向地落下，不过落下的速度，在苹果方面和在地球方面是大不相同的。两个同样大小的相互吸引力，使苹果得到了每秒每秒 10 米的加速度，而地球呢——它的质量比苹果大几倍，它得到的加速度也只有苹果得到的几分之一。地球的质量比苹果的大无数倍，因此，地球向苹果的移动便小到不能再小，实际上只能算做零。所以我们说苹果落到地上，而不说“苹果和地球彼此相向地落下”，就是这个道理。

大力士斯维雅托哥尔怎样死的？

你知道一个大力士斯维雅托哥尔想举起地球来的民歌吗？阿基米德，如果传说可靠的话，也曾经准备做这件事情，要求只要能替他的杠杆找到一个支点。而斯维雅托哥尔呢，他有力气，却不用杠杆。他只想找一个可以抓住的东西，使他那有力的手有地方用力。“只要有地方用力，整个地球我都能举起来。”却也凑巧，这个大力士在地上找到了一个“小褡连”，它搭得很牢；“不会松，不会转，又不会给拔出来”。

斯维雅托哥尔跳下马，
双手抓住小褡连，
把小褡连提得高过了膝盖：
他就齐膝盖陷到地里面。
他苍白的脸上没有泪，却流着血。
斯维雅托哥尔陷在那里，再也起不来。
他的一生就此完结。

如果斯维雅托哥尔懂得作用和反作用定律的话，他也许就会想到，既然他的两脚支撑在地面上，那末，他用来提地球的极大的作用力就会引起同样大小的反作用力，这个反作用力就可以把他自己拉进地里去。

从这个民歌可以看出，在牛顿第一次刊行他的不朽著作《自然哲学的数学基础》（自然哲学就是物理学）前好几千年，人们已经不自觉地应用反作用定律了。

没有支持的东西能够运动吗？

走路的时候，我们是在用脚推开地板或地面；如果地板非常滑，或者是在冰上，我们的脚就没法推，也就不能行走了。机车行动的时候，是用它的“主动”轮在推着铁轨；在结冰的地方，为了使火车能够开动，有时候甚至使用特别的装置，在机车主动轮前面的铁轨上撒沙。在刚开始有铁道的时候，车轮和铁轨上都是有齿的，这正是因为人们认为车轮必须推开铁轨，火车才能前进。轮船是用螺旋推进器的叶子来推开水的。飞机是用螺旋桨来推开空气的。总之，物体在随便哪种介质里运动，都要靠这种介质来支持才行。要是物体本身外围没有什么支持的东西，能不能运动呢？

看来，要做这种运动，简直就象抓住自己头发想把自己提升上去一样，是不可能的运动。的确，物体不能只用内部力量使自己整个向前运动，但是它可以使自己里面的某一部分物质向一方面前进，而另一部分同时向相反的方面前进。你看见过多少次飞行的火箭，可是你想到过它为什么会飞吗？它恰恰就是一个明显的例子，可以用来说明我们现在提到的这种运动。

火箭为什么会飞？

连研究过物理学的人，有时也会对火箭的飞行做出完全错误的解释。他们说，火箭所以会飞，是因为利用在它里面燃烧的火药所生的气体来推开空气。从前的人对火箭的想法是这样的（火箭早就发明了），现在还有许多人也是这样想。可是，如果叫火箭在没有空气的空间里飞，它不但不比在空气里飞得坏，反而会飞得更好。可见火箭运动的真正原因，完全是另一回事。

其实这里发生的情形，同开炮的时候炮弹向前飞去而炮身后坐的情形，是完全一样的。你可以想一下手枪和各种火器在发射时候的“后坐力”！假使把大炮悬在空中不给它一个支持点，炮身在射击以后就会向后运动，它的速度同炮弹向前运动的速度的比，等于炮弹的重量同大炮的重量的比。因此，儒勒·凡尔纳的幻想小说《底朝天》里的主人公，甚至会想到利用大炮的强大后坐力来做一件大事业——“把地轴扶正”。

火箭其实就是大炮，不过它射出的不是炮弹而是火药的气体。中国的轮转焰火能旋转着上升，也是这个道理。装在轮子上的一根火药管，当里面的火药着火的时候，就发生气体向一方面冲出，火药管和跟它连在一起的轮子，就向相反的方向运动。从本质上来看，这也只是一种大家知道的物理仪器“西格纳尔”轮的变相罢了。

有一件有趣的事。在轮船发明以前，曾经有过一种机器船的设计，这也是根据同一原理想出来的。船尾装有强大的压水泵，能够把船里储存的水压向船外，因此这条小船就向前驶去，好象中学物理实验室里用来证明上面说的这条原理的浮在水面上的洋铁罐一样。这个设计（列姆齐提出来的）没有拿来实用过，可是它对轮船的发明却起了很大的作用，因为它向富尔顿暗示了发明轮船的可能性。

我们也知道，最早的蒸汽机是纪元前二世纪的时候希罗制造的，他根据的就是这一个原理：汽锅（图7）里的蒸汽通过管 进到一

安在水平轴上的球里；然后从两个曲柄管冲出，就把管子向相反的方向推，使球开始转动。可惜，希罗式的蒸汽涡轮机在古代只能成一种有趣的玩具，因为奴隶劳动的代价低廉极了，谁也不想使用机器。可是这个原理本身却没有被技术家抛弃。今天我们正在用它来建造反动式涡轮机。

还有一种也是根据这一个原理设计的最早的蒸汽汽车，是提出作用和反作用定律的牛顿设计的：从放在车轮上的汽锅里发出的蒸汽向一面冲出去，于是汽锅就被反作用力推着，使车轮慢慢前进（图8）。

喷气式汽车就是牛顿的汽车的现代形式。

如果有兴趣，可以照图9做一只纸制的小船，这只小船也跟牛顿的汽车极其相象。用一个空的蛋壳做汽锅，汽锅下面放一个顶针，顶针里放一块浸了酒精的棉花，把棉花点着以后，蛋壳里的水便慢慢化成蒸汽；这时候，一股蒸汽就要向一面冲出，使整个小船向相反方向前进。不过，要做这种有教育意义的玩具，得有相当精巧的手艺。

乌贼是怎样活动的？

你听见说，有不少生物都用“抓住头发把自己提起来”的方法在水里行动，一定会很惊奇。

乌贼和大多数头足类软体动物都是用这种方法在水里活动的：经过身体侧面的孔和前面的特别漏斗，它们把水吸入鳃腔，然后经过上面提到的漏斗用力把水压出体外。这样，按照反作用定律，它们就得到了相反的推力，使它们能从后面推动身体很快向前游去。乌贼能够使它们的漏斗管指向旁边或后方，然后用力从里面压出水来，使自己向随便什么方向前进。

水母的行动也是这样，它们收缩肌肉，使从自己那钟形的身体下面排出水来，得到一种反方向的推力。蜻蜓的幼虫水蚤和别种水中动物在行动的时候，也都用同这相似的方法。知道了这些以后，难道我们还会说这样运动不可能吗？

乘火箭到星球上去

有什么比离开地球到无边无际的宇宙空间里去旅行——从地球飞向月球，从一个行星飞到另一个行星——更使人兴奋的吗？用这种题材写的幻想小说，已经不知道有多少种了！哪一种没有引起过我们漫游宇宙空间的幻想呢？伏尔泰在《小麦加》里，儒勒·凡尔纳在《月球旅行记》和《赫克特·雪尔瓦达克》里，威尔斯在《月球上的第一批人》里，此外还有许多别的作家，都曾经幻想过极有趣的宇宙旅行。

难道这种很久以来就幻想着的事情，真的就没有实现的可能吗？难道小说里描写得这样引人入胜、似乎可信的一切聪明的设计，事实上都是不能实现的吗？后面我们还要谈到关于星际旅行的一些理想设计。现在让我们先认识一下已故苏联著名科学家齐奥尔科夫斯基提出的宇宙飞船的实际设计。

能不能乘着飞机上月球去呢？当然不能。飞机和飞艇所以能够运

动，只是因为空气支持着它们，把它们推开去。但是，地球和月亮之间却是没有空气的。在宇宙空间里，没有任何介质可以支持星际飞船。所以必须设计出一种不用任何支持物就能运动和驾驶的飞行设备。

我们已经知道了类似炮弹的玩具——火箭。那末为什么不制造一个巨大的火箭，使里面有特别的、装得下人、食物、空气筒和各种必需品的房间呢？设想人们已经能够在火箭里带上大量燃料，并且能够控制爆炸气体使向随便哪一个方向冲出。那我们就有了一种真正可以驾驶的宇宙飞船，坐在里面可以驶向宇宙空间的大洋，飞上月球和各个行星里去了……坐在里面的人控制气体的爆炸力，就有可能逐渐加大星际飞船的速度，使速度的增加对他们没有危害。希望在某个行星上降落的时候，他们可以转过飞船的头，逐渐减小速度，就会慢慢降落。最后，他们还能用同样的方法飞回地球。

我们可以回想一下，在不久以前，航空家才做了他们那胆怯的初步试飞；而现在，飞机已经能够飞入高空，飞越高山、沙漠、大陆和海洋。那末再过二三十年，星际航行能不能同样的蓬勃发展起来呢？那时候，人们就要挣脱曾经把他们长时期拴在地球上的那条无形的锁链，而冲入广漠无边的宇宙空间去。

第二章力·功·摩擦

关于天鹅、龙虾和梭鱼的问题

关于“天鹅、龙虾、梭鱼跟一车货物”的寓言，是大家都知道的。可是如果有人从力学的观点来研究这个寓言，就会看出寓言作者克雷洛夫所做的结论同我们所得的完全不同。

摆在我们面前的是力学上几个互成角度的力的合成问题。按照寓言，这个力的方向是：

……天鹅在冲向云霄，

龙虾在往后退，而梭鱼在向水里拉。

这就是说（图 12），一个力量——天鹅的拉力——向上，第二个力量——梭鱼的拉力（OB）——向旁边，第三个力量——龙虾的拉力（OC）——向后面。别忘了还有第四个力量——货物的重量，它是竖直向下的。寓言说，“货车现在还在原处”，换句话说，就是加在货物上的几个力的合力等于零。

是这样吗？让我们看一看。冲向云霄的天鹅，不但不会妨碍龙虾和梭鱼的工作，甚至还帮着它们：天鹅的拉力向着重力的反方向，所以减小了车轮跟地面和跟车轴的摩擦，也就是减轻了，甚至完全抵消了货车的重量，——要知道货车并不是很重的（寓言中有句话，“对它们说来，货车似乎是很轻的”）。为了简单起见，让我们假定货车的重量是被天鹅的拉力抵消了，那我们就会看到，剩下来的只有两个力：龙虾的拉力和梭鱼的拉力。这两个力的方向，寓言说，虾是往后退，而梭鱼是在向水里拉。不用说，水一定不在货车的前面而是在它的某一侧面。（克雷洛夫的几个劳动者当然不打算把货车拉下水去！）这就是说，龙虾和梭鱼的力是互相成角度的；既然是这样，它们的合力就决不会等于零。

让我们按照力学的法则，用 OB 和 OC 这两个力做边来画一个平行四边形。四边形的对角线 OD 就代表着合力的方向和大小。很显然，这个合力应当能够移动货车。在货车的全部或部分重量因天鹅的拉力而减小的时候，就更加容易移动。另一个问题是：货车是向哪个方向——向前、向后、还是向旁边——移动的？这就要看这几个力的相互关系和它们所成角度的大小了。

读者如果对力的合成和分解有些实际经验的话，就很容易看出：即使天鹅的力量不能抵消货车的重量，货车也不会停在原处不动。只有在一种条件下，这三个力的作用才能使货车不动。这条件就是车轮跟车轴和跟地面的摩擦力比合力大。但是这跟寓言的内容不合，因为“对它们说来，货车似乎是很轻的。”

这样看来，无论在哪一种情况下，克雷洛夫都不能肯定说“货车一点也没动”，“货车现在还在原处”。不过，这并没有减低这个著名的寓言的思想性。

和克雷洛夫的看法相反

我们刚才看到了克雷洛夫的处世箴言：“同志之间如不能意见一致，

就将一事无成”，但这在力学上并不都是适用的。几个指向不同方向的力，还是能够产生一定的效果的。

克雷洛夫曾经称赞过蚂蚁是模范工作者。但是很少有人知道，这些勤奋的工作者蚂蚁，正是按照这位寓言作者所嘲笑的方式协同工作的。它们的工作，一般说来，所以还能顺利进行，也是由于力的合成的规律。你如果在蚂蚁工作的时候，仔细地观察它们一下，很快就会相信，它们之间只是看来好象是在协作：事实上，每一只蚂蚁都在自管自工作，根本没有想到要帮助同伴。请看一位动物学家所描写的蚂蚁的工作吧：

如果有几十只蚂蚁在平坦的地面上拉一个挺大的捕获物，那末，所有的蚂蚁都在一样地用力，从外表看来，它们是协力工作着。可是当这个捕获物——譬如说是条毛虫——遇到一个障碍物（草根或小石）而不能向前拉，得绕着弯走的时候，就可以明显地看出，每一只蚂蚁都各管各而不是和同伴协同地来越过这个障碍物的（图 13 和图 14）。一只蚂蚁向右拉，另一只向左拉；一只蚂蚁向前推，另一只向后拖。它们更换着位置咬着毛虫的身体，每一只蚂蚁都照着自己的意思推或拉。有时候会有这样的情形：四只蚂蚁推着毛虫朝一个方向前进，六只蚂蚁朝另一个方向前进，这些力量合起来，结果毛虫就不顾四只蚂蚁的反作用，而朝着六只蚂蚁推的方向前进了。

让我们再用一个很好的例子来说明蚁群中的这种假合作。图 15 画着一块正方形的干酪和咬着这块干酪的 25 只蚂蚁。干酪慢慢地沿着箭头 A 所指的方向移动。我们当然可以认为，前面一排蚂蚁是在拉，后面一排是在向前推，两旁的蚂蚁在帮着前后排蚂蚁。可是实际并不是这样，这也不难证明。用小刀把后面那排蚂蚁全部拨开。这时候干酪就会向前移动得更快。原来后面十一只蚂蚁并不是在向前推而是在向后拉。每一只蚂蚁都竭力在朝后退，想把干酪拖到穴里去。可见后排的蚂蚁不但没有帮助前排，反而在全力阻碍它们，抵消它们的力量。搬运这块干酪，其实有四只蚂蚁就够了；可是由于动作不一致，25 只蚂蚁才把这块干酪搬进穴里去。

值得惊异的是，蚂蚁的这种协力工作的特征，马克·吐温早就指出过。他曾经说过一个故事，故事里讲到两只蚂蚁，有一只找到了一条蚱蜢的腿。他说：“它们各自咬住腿的一端，用全力朝相反的方向拉。两只蚂蚁都看出似乎有点不对头，却不明自到底是为了什么。于是它们就发生争吵，并且打起架来……后来它们和解了，重新开始这个毫无意义的协力工作。可是这只在打架的时候受了伤的同伴却成了一个累赘：它不肯放弃这个捕获物，吊在它上面。那只健壮的蚂蚁用尽全力才把食物连同伤伴拖进洞穴里。”……马克·吐温于是取笑地提出了一个完全正确的批评意见说：“只有在光会做不可靠结论的没有经验的博物学家眼里，蚂蚁才是好的工作者。”

蛋壳容易破碎吗？

《死魂灵》里那个深谋远虑的吉法·摩基维支曾在好几个哲学问题

上绞过脑汁，当中有这样的一个问题：“哼，如果象是生蛋的，那蛋壳应该不至于厚到没有什么炮弹打得碎吧！唉，唉，现在是到了发明一种新火器的时候了。”

果戈里的这位哲学家，如果知道普通的蛋壳虽然很薄，却也不是什么脆弱的东西，他一定会大吃一惊的。把蛋放在两手的掌心之间，用力挤压它的两端，是不是很容易把它压碎呢？在这种情况下要压碎蛋壳，非用很大的力气不可（图 16）。

蛋壳所以特别坚固，完全因为它的形状是凸出的。各种穹窿和拱门所以都很坚固，也是由于同样的道理。

图 17 的窗顶上有一个小型石拱。重量 S（也就是窗顶上面那部分砖墙的重量）向下施着压力，压在拱门中心那块楔形石头 M 上，这里用箭头 A 表示着。但是这块石头由于是楔形的，所以不能向下移动；它只能压在相邻两块石头上。这时候力 A 可以按照平行四边形的规则分解成两个力，象箭头 C 和 B 表示的那样；这两个力被相邻两边石块的阻力平衡了，而这两块石块又被挤在旁边的石块中间。因此，从外面压在拱门上的力量就不会把拱门压坏。可是如果从里面向它用力，那就比较容易把它破坏了，因为石块的楔形虽然能够阻止它下落，却不能阻止它上升。

蛋壳也是这样的拱门，不过这个拱门是整块的，不是由一块一块的东西迭成的。蛋壳虽然很脆，但是在受到外来压力的时候，却不那么容易碎，就是这个道理。我们可以把一张相当重的桌子的四条腿，放在四个生鸡蛋上，结果蛋壳也不会破。（为了使鸡蛋站稳并且增大受压的面积，需要用石膏把鸡蛋的两头加宽。石膏是容易粘附在石灰质的蛋壳上的。）

现在你们就可以理解，为什么母鸡不必害怕自己身体的重量会压破蛋壳；同时又可以懂得为什么弱小的鸡雏想要脱离天然囚笼的时候，却只要用小嘴在里面啄几下蛋壳，就不难出来了。

侧着茶匙敲蛋壳，很容易把它敲碎，因此，我们就料想不到，蛋壳在天然条件下承受压力是多么的坚固，大自然用来保护蛋壳里发育着的小生物的盔甲，是多么的坚固。

电灯泡看来好象很脆弱，实际上却极坚固，这同蛋壳很坚固是同样的道理。然而电灯泡的坚固性还要惊人，因为我们知道有许多灯泡（真空的，不是充气的）几乎完全是空的，里面没有什么物质用来抵抗灯泡外面空气的压力。空气对电灯泡的压力并不小。直径 10 厘米的灯泡两面所受的压力，就在 75 公斤以上（一个人的重量）。实验指出：真空灯泡甚至还能经受住 2.5 倍这么大的压力。

帆船逆风前进

很难想象帆船怎样能够逆着风前进。水手的确会告诉你们，正顶着风驾驶帆船是不可能的，帆船只能在跟风的方向成锐角的时候前进。可是这个锐角很小——大约只有直角的四分之一，大约是 22° ，——不管是正顶着风或者成 22° 的角度，看来是同样难以理解的。

可是实际上，这两种情形不是没有区别的。我们现在来说明帆船是怎样跟风向成小角度逆着风前进的。首先，让我们看风一般是怎样对船

帆起作用的，也就是说，当风吹在帆上的时候，它把帆往哪里推。你也许会这样想，风总是把帆推往它所吹的方向去。然而实际并不是这样。无论风向哪里吹，它总产生一个垂直帆面的力，这个力推动着船帆。且让我们假定风向就是图 18 箭头所指的方向。AB 线代表帆。因为风力是平均分布在全部帆面上的，所以我们可以用 R 来代表风的压力，它作用在帆的中心。把这力分解成两个：跟帆面垂直的力 Q 和跟帆面平行的力 P（图 18 右）。力 P 不能推动帆，因为风跟帆的摩擦太小了。剩下的力 Q 依着垂直帆面的方向推动着帆。

懂得了这点，就容易懂得为什么帆船能够在跟风向成锐角的情况下过着风前进了。让我们用 KK 线（图 19）代表船的龙骨线。风照箭头所表示的方向成锐角吹向这条线。AB 线代表帆面，我们把帆转到这样的位置，使帆面刚好平分龙骨的方向和风的方向之间的那只角。现在看图 19 里的力的分解。风对帆的压力，我们用力 Q 来表示，这个力，我们知道应当是跟帆面垂直的。把这个力分解成两个力：使力 R 垂直龙骨线，力 S 顺着龙骨线指向前面。因为船朝力 B 的方向运动的时候，是要遇到水的强大的阻力的（帆船的龙骨在水里很深），所以力 R 几乎全部被抵消了。剩下的只是指向前面的力 S 在推动船，因而，船是跟风向成着一个角度在前进，好象在逆风里一样。这种运动通常总采取“之”字形路线，象图 20 里的那样。水手们把这种行船法叫做“抢风行船”。

阿基米德能举起地球吗？

“给我一个支点，我就能举起地球”，相传这是古代发现杠杆原理的力学家阿基米德说的话。我们在波卢塔克的书里读到：“有一次，阿基米德写了一封信给叙拉古国王希伦，他同这位国王既是亲戚，又是朋友。信里说，一定大小的力可以移动任何重量。他喜欢引用有力的证明，补充说：如果还有另一个地球的话，他就能到上面去，把我们的地球移动。”

（采自 1780 年出版的一本书里的一幅木刻）

阿基米德知道，如果利用杠杆，就能用一个最小的力，把不论怎样重的东西举起来：只要把这个力放在杠杆的长臂上，而让短臂对重物起作用。因此，他又想到，如果用力压一根非常长的杠杆臂，他的手就可以举起质量等于地球的重物。

然而如果这个古代伟大力学家知道地球的质量是多么大，他也许就不会这样夸口了。让我们设想阿基米德真的找到了另一个地球做支点；再设想他也做成了一根够长的杠杆。你知道他得用多少时间才能把质量等于地球的一个重物，哪怕只举起一厘米呢？至少要三十万万万年！

原来地球的质量天文学家是知道的。质量这样大的物体，如果把它拿到地球上称的话，它的重量大约是：

6,000,000,000,000,000,000,000 吨。

如果一个人只能直接举起 60 公斤的重物，那末他要“举起地球”，

不难证明，在帆面平分龙骨的方向和风的方向之间的那只角的时候，力 S 的数值最大。

“举起地球”这句话，我们指的是，在地球表面上举起一个质量等于地球的重物。

就得把自己的手放在一根这样长的杠杆上，它的长臂应当等于它的短臂的 100,000,000,000,000,000,000,000 倍！

简单地计算一下就可以知道，在短臂的那一头举高一厘米，就得把长臂那一头在宇宙空间里画一个大弧形，弧的长度大约是

1,000,000,000,000,000,000 公里。

这就是说，阿基米德如果要把地球举起一厘米，他那扶着杠杆的手就得移动大到这样不可想象的一个距离！那末他要用多少时间才能做完这件事呢？如果我们认为阿基米德能在一秒钟里把 60 公斤的重物举高一米（这种工作能力已经几乎等于一马力！），那末，他要把地球举起一厘米，就得用去

1,000,000,000,000,000,000,000 秒，

或三十万万万年！可见阿基米德就是用一辈子时间按着杠杆，也不能把地球举起象极细的头发那样粗细的一段距离。

不管这位天才的发明家怎样聪明，他也没法显著地缩短这段时间的。“力学的黄金律”告诉我们，任何一种机器，如果在力量上占了便宜，在位置移动的距离上，也就是在时间上一定要吃亏。即使阿基米德的手能够运动得和自然界最大的速度——光速（每秒 300,000 公里）——一样快，他也只能在做了十几万年的工作以后，才能把地球举起一厘米。

儒勒·凡尔纳的大力士和欧拉的公式

你记得儒勒·凡尔纳书里的竞技大力士马蒂夫吗？“头大身高，胸膛象铁匠的风囊，腿象粗壮的木柱，胳膊象起重机，拳头象铁锤……”这位大力士的功劳在《马蒂斯·桑多尔夫》这部小说里叙述得很多，可是使读者印象最深的，大概是他用手拉住一条正在下水的船“特拉波科罗”号这件事。

关于这件事，小说的作者是这样告诉我们的。

已经移去了在两旁撑住船身的支持物，船准备下水了。只要把缆索解开，船就会滑下去。已经有五六个木工在船的龙骨底下忙着。观众满怀好奇心注视着这件工作。这时候，却有一只快艇绕过岸边凸出的地方，出现在人们眼前。原来这只快艇要进港口，必须经过“特拉波科罗”号准备下水的船坞前面。所以一听见快艇发出信号，大船上的人为了避免发生意外，就停止了解缆下水的操作，让快艇先过去。假使这两条船，一条横着，另一条用极高的速度冲过去，快艇一定会被撞沉的。

工人们停止了锤击。所有的眼睛全都注视着这只华丽的船。船上的白色篷帆在斜阳下象镀了金一样。快艇很快就出现在船坞的正前面。船坞上成千的人都出神地看着它。突然听到一声惊呼，“特拉波科罗”号正当快艇的右舷对着它的时候，开始摇摆着滑下去了。两条船就要相撞了。已经没有时间、没有方法能够防止这场惨祸了。“特拉波科罗”号很快地斜着向下面滑去……船头上卷起了因摩擦而起的白雾，船尾已经

没入了水。

突然出现了一个人，他抓住了挂在“特拉波科罗”号前部的缆索，用力地拉，几乎把身子弯得接近了地面。不到一分钟，他已经把缆索绕在钉在地里的铁桩上。他冒着被摔死的危险，用超人的气力，用手拉住缆索大约有十秒钟。最后，缆索断了。可是这十秒钟时间已经很足够：“特拉波科罗”号进水以后，只轻微地擦了一下快艇，就向前驶了开去。

快艇已经脱了险。至于这个使这件发生得很快意外事件没有造成惨祸的人——当时甚至别人来不及帮助他——就是马蒂夫。

假使小说的作者听到说，这样的功劳并不需要一个象马蒂夫那样的“力大如虎”的巨人，而是每一个机智的人都能干的话，那他一定会非常惊奇。

力学告诉我们，缠在桩上的绳索，在滑动的时候，摩擦力可以达到极大的程度。绳索绕的圈数越多，摩擦力也就越大。摩擦力增长的规律是：如果圈数按照算术级数加多，摩擦力就按照几何级数增长。所以就是一个小孩子，只要能把绳索在一个不动的轱辘上绕三四圈，然后抓住绳头，他的力量就能平衡一个极大的重物。在河边的轮船码头上，常常有一些少年，就用这个方法使载着几百个乘客的轮船靠码头。原来在这里帮助他们的，并不是他们异常的臂力，而是绳和桩子之间的摩擦力。

十八世纪著名数学家欧拉，曾经确定了摩擦力跟绳索绕在桩子上的圈数之间的关系。我现在把欧拉的有用的公式引在下面，给那些不怕简洁的代数语言的读者参考：

$$F = fe^{ka}$$

在这个公式里， f 代表我们所用的力， F 代表我们所要对抗的力。 e 代表数 2.718.....（自然对数的底）， k 代表绳和桩子之间的摩擦系数。

代表绕转角，也就是绳索绕成的弧的长度跟弧的半径的比。

把这个公式应用在儒勒·凡尔纳的故事里，所得的结果非常使人吃惊。这里，力 F 是沿着船坞滑下去的船对缆索的拉力。从小说里我们知道，船的重量是 50 吨。假定船坞的坡度是 $1/10$ ，那末，作用在缆索上的就不是船的全重，而是全重的十分之一，也就是 5 吨或 5000 公斤。

再说，把 k ——缆索和铁桩之间的摩擦系数——的数值算做 $1/3$ 。

的数值是不难计算的。如果我们假定马蒂夫曾经把缆索绕桩三圈。这时候：

$$= \frac{3 \times 2}{r} r = 6$$

把这些数值代进欧拉的公式，就可以得到：

$$5000 = f \times 2.72^6 \times \frac{1}{3} = f \times 2.72^2$$

未知数 f （就是需要的人力）可以用对数求出来：

$$\log 5000 = \log f + 2 \log 2.72,$$

得到 $f = 9.3$ 公斤。

因此，这个大力士只要用 10 公斤力气就可以把缆索拉住，立下这次大功了！

你别以为这个数值——10 公斤——不过是理论上的，实际需要的一定比这大得多。恰恰相反，这个数对我们说来已经太大了：古时候用来系船的是麻绳和木柱，在这两种东西之间，摩擦系数 k 比上面所用的数值更大，所以所需要的力量简直小得可笑。只要绳索够牢，吃得住拉力，就是力气小的孩子，把它套在柱上绕三四圈以后，也能同样立下这个儒勒·凡尔纳小说里的大力士所立的功劳，或者还能胜过他哩。

结为什么能打得牢？

在日常生活里，我们毫无疑问常常在享受欧拉公式所指出的利益。譬如打结。我们不就是把一条绳索的一端当做桩子，而让这根绳的其余部分缚在上面吗？各种各样的结——普通结、“水手结”、“纽带结”、“蝴蝶结”等等——所以能打得牢，完全是由于摩擦的作用。由于绳索围着自己缠绕着，象绳索围着支架缠绕着一样，所以摩擦力增大了许多倍。研究一下结里的许多曲折，就不难相信这一点。曲折越多，或是绳子围着自己缠绕的圈数越多，它的绕转角就越大，结也打得越牢。

缝衣工人钉钮扣，也常常在不知不觉中使用着这个方法。他把线头绕许多转，然后把线扯断。这样，只要线是坚韧的，钮扣就不会掉下来。这里所利用的还是我们已经知道的那条规律：线的圈数照算术级数加多的时候，钮扣的牢固程度就照几何级数增长。

如果没有摩擦，我们甚至连钮扣都没法使用：线在钮扣的重力下会自己松开，使钮扣脱落。

假如没有了摩擦

你看，在我们的周围，有各种各样的摩擦现象，这种现象有时非常出人意料。有时甚至连我们想不到的地方，也会出现极重要的摩擦现象。假如摩擦在世界上突然消灭了的话，许多普通现象都会完全按照另一种方式进行。

法国物理学家希洛姆对于摩擦现象曾经有过生动的描写。

我们有时候走上了结着冰的路。为了使身体不致跌倒，我们得用多少力气；为了站稳，又得做多少可笑的动作！这就不得不使我们承认，我们平时所走的路面有多么宝贵的性质，由于这种性质，我们才不必特别用力，就能保持平衡。当我们骑着自行车在很滑的路上滑倒的时候，或是马在柏油路上滑倒的时候，我们也会产生同样的思想。研究了类似的现象以后，我们就可以看出摩擦带给我们的后果了。工程师竭力在设法除掉机器上的摩擦，并且得到了很好的成绩。在应用力学里，常常把摩擦说成是最不好的现象。这当然是对的，可是也只有几个狭窄的领域里才能算是对的。至于在别的情况下，我们还应当感谢摩擦：它使我们能够毫不提心吊胆地走路、坐定和工作；使书和墨水瓶不会落在地板

上；使桌子不会自己滑向墙角；使钢笔不会从手里滑掉。

摩擦是一种非常普遍的现象。除了很少几种特殊情况以外，我们用不着去找它，它自己就会来帮我们忙。

摩擦能够促进稳定。木工刨平地板，目的是使桌子和椅子放在哪里就留在哪里。只要不是在正在摇晃的轮船里，放在桌子上的杯盘，用不到我们特别照顾，就会不动地留在桌子上。

如果我们设想已经完全没有摩擦了。这时候任何物体，不论是大石块或是小沙粒，就再也不能相互支持了。所有的东西都要滑着，滚着，直到铺成一个平面为止。如果没有摩擦，地球就象流体一样，变成了一个一点高低都没有的圆球了。

我们还可以补充说，没有了摩擦，铁钉和螺钉会从墙上滑出来，我们的手也不能拿东西，任何建筑物都不可能建造起来。起了旋风就永远不会平息。我们会不断地听到发出的声音的回声，因为它从墙壁上反射回来，一点也没有被削弱。

每一次地面上的冻冰，都使我们清楚地看出摩擦的重要性。遇到街上结冰的时候，我们会弄得毫无办法，并且随时都有滑倒的危险。下面是从报上摘下来的几段消息（1927年十二月）：

“伦敦二十一日消息，由于地面结了冰，伦敦的街车和电车行动都发生困难。大约有1400人摔坏了手脚等等，被送入医院。”

“在海德公园附近，三辆汽车跟两辆电车相撞。由于汽油爆炸，车辆全部被烧毁。”

“巴黎二十一日消息，巴黎城和近郊，由于街道结冰，发生了许多不幸事件……”可是在冰上摩擦力极小这一点，在技术上也可以利用。普通的雪橇就是例子。更好的例子是那用来把树木从伐木的地方运输到铁道或浮送站去的所谓冰路。在这种平滑的冰路上，用两匹马可以拉动装着七十吨木材的雪橇（图22）。

“切留斯金”号失事的物理原因

根据以上所说，可不要立刻得出结论，认为冰上的摩擦力不管在什么情况下都微不足道。有时候，即使在接近零度的时候，冰上的摩擦力也往往很大。近年来，苏联破冰船的工作人员已经仔细地研究了北极海上的冰加在轮船钢壳上的摩擦力。这种摩擦力似乎出人意料地大，并不比铁跟铁之间的摩擦力小。冰对新船的钢壳的摩擦系数是0.2。

为了明白这个数字对于在冰块之间航行的船有多大的意义，可以研究一下图23。在这个图里，画着在冰块的压力下，船舷MN所受到的各个力的方向。冰的压力P分解成两个力：跟船舷垂直的力R和跟船舷相切的力F。P和R之间的角等于船舷对竖直线的倾斜角。冰对船舷的摩擦力Q等于力R乘摩擦系数0.2，也就是 $Q = 0.2R$ 。如果摩擦力Q比F小，力F就会把压在船身上的冰推到水里去；这时候冰就会沿着船舷滑动，并不会损害这船。如果力Q比F大，摩擦就妨碍着冰块的滑动，使冰块长时间压在船舷上，就要把船舷压坏。

那末，在什么时候 $Q < F$ 呢？很容易看出 $F = R \cdot \tan \alpha$ ，因此 $Q < R \cdot \tan \alpha$

。又因为 $Q=0.2R$ ，所以不等式 $Q < F$ 又可以变成： $0.2R < R \cdot \tan \alpha$ 或 $\tan \alpha > 0.2$ 。

从三角函数表里可以查出，正切函数是 0.2 的角是 11° 。这就是说，在 $\alpha > 11^\circ$ 的时候， $Q < F$ 。根据上面所说的，就可以确定船舷对竖直线的倾斜度应该是多少，才能保证船在冰块中间安全航行。这个倾斜度应该不比 11° 小。

现在让我们看“切留斯金”号是怎样沉没的。“切留斯金”号实际是一艘轮船，不是破冰船。它在北海的全部航路上都航行得很安全，但是在白令海峡却被冰块挤破了。

冰把“切留斯金”号带到了遥远的北方，并且把它毁了（在 1934 年二月）。大家都知道，船上的水手在冰上等待了两个月，然后由飞行员把他们救了出来。

下面是这次失事的经过。

“坚固的金属船身不是一下子就被压坏的，”远征队队长施米特在无线电里报告说。“我们看到冰块怎样压在船舷上，以及露在冰块上面的船壳的铁板怎样向外臃起来并且弯曲了。冰块不断地向船进攻，这种进攻虽然很慢、却是没法防御的。臃起的船壳的铁板沿着铆缝裂了开来，铆钉噼噼啪啪地飞走了。转瞬间，轮船的左舷从前舱到甲板的末梢完全撕裂了……”

读了上面这一段话以后，读者应当可以了解那次出事的物理原因了。

从这里也得出了一个实际的结论：在建造航行在冰里的船舶的时候，一定要使船舷有适当的倾斜度，也就是倾斜度应该不比 11° 小。

自己会平衡的木棒

把一根光滑的木棒象图 24 那样放在分开的两手的食指上。现在相向移动两个手指，直到合并在一起为止。非常奇怪，两个手指碰在一起的时候，木棒还保持着平衡，并没有掉下来。你可以把这个实验重复做几次，并且每次变换手指一开始放的位置，可是结果总是一样：木棒最后总是平衡着。如果不用木棒，而是用画图的尺、有杖头的手杖、打弹子的棒、擦地板的刷子，也能得到同样的结果。

这种出人意料的结果是怎样得到的呢？

首先应当明白：木棒平衡在合并在一起的两个手指上的时候，两个手指显然是在木棒的重心下面（如果从重心引出的一条竖直线能够通过支持物的范围里，那末这物体就在平衡状态中）。

在两个手指分开的时候，离木棒重心近的那个手指，负荷的重量比较大。压力大，摩擦力也大；离重心近的那个手指一定会比离重心远的手指受到更大的摩擦力。因此离重心近的手指就不在木棒下面滑动；滑动的总是那个离重心远的手指。一当滑动的那个手指比不滑动的那一个更接近重心的时候，就换了一个手指滑动了。经过几次这样的交换，两个手指就并在一起。因为每次只有一个离重心比较远的手指在移动位置，所以两个手指最后碰在一起的地方，必然是在木棒重心的下面。

在结束这个实验以前，让我们用擦地板刷子（图 25，上）再做一次，

并且同时提出这样一个问题：如果在两个手指碰在一起的地方把刷子切成两段，再把它们各放在天平的一头（图 25，下）。那末，哪一头会比较重些——是柄的那一头，还是刷子那一头？

看来，刷子的两部分既然能在手指上平衡，那末在天平上也应当能够平衡。可是事实上，刷子的那一头要比较重些。这又是什么道理呢？原来刷子平衡在手指上的时候，两部分的重力是加在一根杠杆的长短不等的两臂上的，而在天平上，这两部分重力是加在一条等臂的杠杆的两端的。

我们还可以置备一些棒，它们重心的位置各不相同，把这些棒在重心地方切成长短不同的两段。把每根棒的两部分放在天平上，你一定会非常惊奇，原来短的一段总比长的一段要重些。

第三章 圆周运动

陀螺旋转的时候为什么不会倒？

在小时候曾经玩过陀螺的成千上万个人里面，恐怕没有多少人能够正确地回答这个问题，为什么一个直立着转甚至歪斜着转的陀螺会出乎意料地不倒呢？是什么力量把它维持在这种好象很不稳定的状态呢？难道它能不受重力的作用吗？

原来，这里有一种极有趣的力的相互作用。陀螺的原理不很简单，这里不打算深入研究。这里只谈一谈旋转着的陀螺所以能够不倒的基本原因。

图 26 是一个照着箭头所指的方向旋转着的陀螺。请注意它边上写着 A 字的那一部分，和在它对面写着 B 字的那一部分。A 的部分在离开你，而 B 的部分在向着你转过来。现在再看，当你把陀螺的轴向你自己这一面侧倒的时候，这两部分会起什么样的运动。你这样推它，就是使 A 的部分的运动向上斜，B 的部分的运动向下斜；使这两部分都得到一种跟自己本来的运动成直角的推动。可是，陀螺在很快旋转的时候，它的圆周速度非常大，而你推它的时候所给它的那个速度却很小。一个小速度和一个大速度结合而成的速度，自然跟圆周的大速度相差不大。所以陀螺的运动几乎没有改变。陀螺好象抵抗着一切想把它推倒的力量。同时陀螺越重和转得越快，就越能顽强地抵抗推倒它的力量。这就是陀螺能够不倒的原因。

这个解释，在本质上同惯性定律有直接关系。陀螺上的每一个点，都在一个跟旋转轴垂直的平面里沿着一个圆周转。按照惯性定律，每一个点随时都竭力想使自己沿着圆周的一条切线离开圆周。可是所有的切线都同圆周本身在同一个平面上。因此，每一个点在运动的时候，都竭力想使自己始终留在跟旋转轴垂直的那个平面上。由此可见，在陀螺上所有跟旋转轴垂直的那些平面，也竭力在维持自己在空间的位置。这就是说，跟所有这些平面垂直的那旋转轴本身，也竭力在维持自己的方向。

我们不准备研究陀螺在外力作用下所发生的一切运动。这需要很多解释，未免会枯燥无味。我只想解释一下，一切旋转物体所以能够使它们的旋转轴的方向保持不变，原因在哪里。

旋转物体的这种性质正被现代技术广泛地利用着。在现代轮船和飞机上装置的各种回转仪，象罗盘、稳定器等，都是根据陀螺原理造成的。旋转的作用保证了炮弹和枪弹飞行的稳定性，也可以用来保证人造卫星、宇宙火箭等在真空中运动的稳定性。陀螺似乎只是一种简单的玩具，谁知它竟有这么多的用途！

魔术

魔术里许多使人吃惊的场面，也是根据旋转物体能够使旋转轴保持原来方向的原理演出的。约翰·培里教授写过一本有趣的书，叫做《旋转着的陀螺》，让我从里面摘录几段介绍给大家。

有一次我选做了几种自己的试验……我竭力想使听众感到兴趣，就对他们说，如果你想把一个圆环抛出去刚好落在预先指定的地方，你应该使圆环得到一种旋转的运动。如果你想把一顶帽子扔出去能够让别人用手杖接住，你也得这样做。原来在改变旋转物体的轴的方向的时候，它一定会产生反抗作用的。接下去我又向听众讲，如果把炮膛的里面磨光，炮就会瞄不准。因此现在都做来复线炮膛，这就是说，在炮膛里面刻着螺纹线，使炮弹在火药的爆炸力下通过炮膛的时候，得到一种旋转的运动。这样，炮弹离开炮口以后，就正确地做着一定的旋转运动前进。

我在那次讲演里能够做到的只有这些，因为我自己既不会掷帽子，也不会耍盘子。可是在我讲完以后，有两位魔术师走上台来，他们演出了几套戏法。这两个艺人的每个表演都是我刚才所讲的那些定律的最好的实际例证。他们互相抛掷旋转着的帽子、盘子、桶箍、伞……一个魔术师把许多刀子抛入空中，落下的时候把它们接住，又极准确地向上抛。观众们刚听过关于这些现象的解释，所以都欢呼起来，表示满意。他们都看到魔术师旋转了每把刀子，然后把它们抛上去；因为只有这样，才能够准确地知道刀子会取怎样的位置回到手里来。

哥伦布的问题的新解决

哥伦布解决自己提出的有名的问题——怎样把鸡蛋竖起来——的方法真是简单极了：只是把蛋壳打破。

这个问题这样解决，其实是不正确的。哥伦布打破蛋壳，就是改变了它的形状，也就是说，他竖的已经不是鸡蛋，而是别的物体了。要知道这个问题的全部要点就在蛋的形状上；改变了它的形状，就是等于用另一种物体代替了鸡蛋。所以哥伦布提出的方法，并没有解决鸡蛋的立立问题。

我们如果利用陀螺的原理，却能解决这个问题，同时又一点也不改变鸡蛋的形状。这只要使鸡蛋依着自己的长轴做旋转运动就可以了；这样，就可以让它的钝的一端向下，甚至尖的一端向下，直立一会而不倒下去。图 31 画着这个动作的做法：用手指旋转鸡蛋。放开手，鸡蛋还会竖着旋转一会。这个问题这样才算是真的解决了。

做这个试验，一定要用煮熟的鸡蛋。这一点限制同哥伦布问题里的条件并没有矛盾。哥伦布提出问题以后，立刻就从餐桌上拿起一个鸡蛋，餐桌上的鸡蛋当然不会是生的。我们未必能使生鸡蛋立着转，因为生鸡蛋里面是液体，它会阻止鸡蛋的旋转。顺便说说，许多家庭主妇都知道这个简单的方法可以用来区别生鸡蛋和熟鸡蛋。

重量“消失”了

应当指出，虽然一直来有哥伦布竖鸡蛋的传说，但是这并没有历史根据。摩尔瓦把很久以前别人因为完全不同的动机做过的事，硬加在这位著名航海家身上，做这件事的是意大利建筑家布鲁涅勒斯基（1377-1446），他是佛罗棱萨教堂的巨大圆屋顶的建造者（“我的圆屋顶这样坚固，就好象竖在自己尖端上的鸡蛋一样！”）。

“把盛水的器具甩着转的时候，里面的水不会泼出来；甚至把这个器具转得底朝天，水也不会泼下来，因为旋转运动阻止着水泼出来”，这是两千年前亚理斯多德写的几句话。图 32 画的就是这个试验：盛水的桶转得足够快的时候，即使你把桶转得桶底朝天，象图上所画的那样，桶里的水也不会泼下来。毫无疑问，许多人都曾经做过这种试验。

这种现象平时都把它解释成由于“离心力”作用的关系。离心力是一种想象的力，它好象是加在物体上的，物体受了它的作用，总想远离旋转轴。这种力量其实并不存在：物体所以要远离旋转轴，不过是惯性的一种表现，而所有由于惯性的运动，都是不必用力就可以实现的。在科学里，离心力的意思不是别的，只是旋转着的物体拉紧缚住它的线或是压在它的曲线轨道上的实在的力量。这种力量不是加在运动着的物体上的，而是加在阻止物体做直线运动的障碍物——线、转弯地方的铁轨等——上面的。

让我们抛弃掉那种意义不明确的离心力的概念，来研究水桶旋转时候所产生的现象的原因。我们可以先向自己提出这样一个问题：如果在桶壁上开一个孔，冲出来的那股水要向哪个方向运动？如果没有重力，这股水在惯性作用下，会沿着圆周 AB 的一条切线 AK 冲出去（图 32）。可是重力会强迫这股水落下来，形成一条曲线（抛物线 AP）。如果圆周速度够大，这条曲线就会落在圆周 AB 的外面。所以这股水告诉我们，如果不是桶阻碍着，水在桶转的时候会走什么样的路线。现在已经很明白，水根本不会竖直向下动，因此也就不会从桶里泼下来。水只有在一种情况下会从桶里泼出来，就是桶口朝着旋转的方向。

现在让我们来计算一下，在这个试验里水桶要转得多快，水才不会向下泼。这个速度应当是：旋转的水桶的向心加速度要不比重力加速度小。因为只有这样，才会使水冲出来的时候所走的路线落在水桶所画的圆周的外面，而桶不管转到哪里，水也不会从桶里泼出来。计算向心加速度 W 的公式是：

$$W = \frac{v^2}{R},$$

在这里， v 是圆周速度， R 是圆形路线的半径。我们知道在地球表面上的重力加速度 $g = 9.8$ 米 / 秒²，因此我们就有一个不等式：

$$\frac{v^2}{R} \geq 9.8。$$

假设 R 等于 70 厘米，那末，

$$\frac{v^2}{0.7} \geq 9.8, \text{ 所以 } v \geq \sqrt{0.7 \times 9.8}; v \geq 2.6 \text{ 米 / 秒。}$$

很容易算出，要得到这样大的圆周速度，只要我们拿绳的手每秒钟大约转三分之二圈就够了。这样的旋转速度是完全可以做到的，所以这个试验能毫不困难地做成功。

在容器依着水平轴转的时候，液体会压在容器的壁上。这种性质在技术上已经利用在所谓离心浇铸上。这里主要的是：不均匀的液体会按照它们的比重成层地分开来。比较重的成分会落在离旋转轴远的地方，比较轻的成分会落在离轴近的地方。因为这样，含在熔化的金属里会在

铸件里造成气泡的气体，就从金属里分离出来，跑到铸件里面的空处。用这种方法铸成的铸件比较密实，并且不含气泡。离心浇铸法比普通的压铸法成本低，并且不需要复杂的设备。

你也可以做伽利略

有许多城市为爱好强烈刺激的人预备了一种极别致的娱乐，叫做“魔术秋千”。我没有玩过这种秋千，所以只能从一本科学游戏集里抄下来一段描写它的文字：

在离地面很高的地方，有一根很坚固的横贯屋子的梁，梁上挂着秋千。大家在上面坐定以后，工作人员就关上门，撤去进屋子的跳板。这时候他宣布，他马上要让玩秋千的游客有机会去做一次短期的空中旅行了，说完以后，他就轻轻地推动秋千。然后自己就坐在后面，象驾马车的人坐在马车后面一样，或者干脆走出这间屋子。

这时候，秋千摆动的幅度越来越大，看来就要荡得同横梁一样高了。秋千越荡越高，最后，它绕着横梁转了一周。运动越来越快了，这些荡秋千的人虽然大部分都已经知道这个游戏实际上是怎么一回事，也感到自己的确是在摆动，的确在做着迅速的运动。他们似乎觉得自己的头有时候是倒挂着，所以就本能地抓着坐位的扶手，免得跌下来。

不久，秋千摆动的幅度开始减小了，已经不再同横梁一样高了。又过了几秒钟，它完全停了下来。

事实上，这秋千始终挂在那里，没有动过，而是这间屋子在一种非常简单的机件帮助下，绕着水平轴在游客周围转动着。屋子里的各种家具，都是固定在地板上或墙壁上的。那个罩着大灯罩的电灯看来好象很容易跌倒，其实也是焊在桌子上的。管理秋千的工作人员好象曾经轻轻地推动过秋千，使它荡起来，而实际上是屋子轻轻地摆动了一下，他只是做一个推的样子。所有一切都促成大家的错觉。

这个错觉的秘密，简直简单得可笑。然而在你现在懂得了这是怎么一回事以后，再去玩这个魔术秋千，你还是会受它欺骗的。错觉的力量竟有这样大！

普希金的一首关于“运动”的诗，你还记得吗？

“世界上没有运动，”一个满腮胡须的哲人说。

另一个哲人不开口，却在他面前来回地走。

他这个反驳真是再有力也没有。

人们都赞美这个奥妙的答复。

可是，先生们，这个有趣的事件，

使我想起了另外一个例子：

谁都看见太阳每天在我们头上走，

然而正确的却是固执的伽利略。

指希腊哲学家芝诺（纪元前五世纪），他说，世界本是不动的，只因为我们有了错觉，所以好象任何物体都在运动。

指第奥根尼。

在那些不懂秋千秘密的游客当中，你也可能做一个伽利略。你同伽利略有一点不同：伽利略曾经向大家证明太阳和星是不动的，我们自己才在旋转。而你却要向大家证明：我们是不动的，整个屋子在围着我们转。但你同伽利略一样，所说的话都和常见的情况相反，所以你也很可能走上伽利略的可悲的遭遇：被大家看做是一个睁眼说瞎话的人……

我们两人之间的争论

你要证明你的见解是正确的，也许不象你所想象的那样容易。设想你是在魔术秋千上，并且希望说服坐在你旁边的那些人，说他们是错了。譬如说你争辩的就是我。我同你一起坐在秋千上。等到秋千摆动起来，看来正要开始绕着横梁翻斤斗的时候，我们就进行辩论：究竟是秋千还是整个屋子在转动。我们只是要记住，在争论的时候，我们不要离开秋千，并且事先带着一切要用的东西。

你：我们并没有动，而是屋子在转动，这一点还有什么可怀疑的呢！要知道我们的秋千如果真的是底朝上的话，那我和你决不会只是头朝下挂着，而是会从秋千上掉下去。但是你看，我们并没有掉下去。所以我说，转的不是秋千，而是屋子。

我：可是请你记住，水桶在转得很快的时候，虽然它的底朝天，里面的水也不会泼出来（第 52 页）。自行车在“魔环”里，虽然骑车的人（第 64 页）头朝着下面，也不会掉下来。

你：既然如此，让我们来算一下向心加速度，看它是不是能使我们不从秋千上掉下去。知道了我们同旋转轴的距离，和每秒钟的转数，我们不难按照公式计算出来……

我：你不用算。建造“魔术秋千”的人知道我们会有争论的，所以早就告诉过我，转数是完全足够使我们按照我的意思来说明这个现象的。所以计算并不能解决我们的争论。

你：可是我还没有失去说服你的信心。你看这玻璃杯里的水，并没有流在地板上……不过这你已经用水桶旋转的试验驳倒我了。那末好吧，我手里还有一个铅锤，它始终朝着我的脚，也就是说，一直朝着下面，如果是我们在旋转，而屋子停着不动，这个铅锤就会始终向着地板，也就是说，有时候会朝着我们头的那一个方向，有时候会朝着旁边。

我：你错了，如果我们转得非常快，那末这个铅锤也总是顺着旋转半径从旋转轴往外抛出去；也就是说，它一定象我们看见的那样，始终朝着我们的脚的那一个方向。

争论结束了

现在让我告诉你们，怎样才能在这场争论里得到胜利。在你走上“魔术秋千”的时候，应当随身带一个弹簧秤，并且在秤盘里放上一块譬如说是一公斤重的砝码，然后看指针在哪里。它始终告诉我们这个砝码是一公斤重。这就是秋千不动的证据。

原来，如果我们带着弹簧秤绕着轴旋转，那末作用在砝码上的，除了重力以外，还有离心作用。这个离心作用在圆周路线的下半圈的各点

上，会加大砝码的重量，而在上半圈的各点上，又会减小它的重量。这样，我们就能看到这个砝码有时候要变得重些，有时候却差不多一些重量都没有。既然没有看到这种情况，就可以确定是屋子在转，不是我们在转。

在“魔”球里

有一个公园，为了供游人消遣，建造了一个极有趣而且有教育意义的转盘。那是一个旋转着的球形屋子。来到这里的人都会感到一种异常的感觉，这种感觉我想恐怕只有在梦里或者在神怪故事里才可能有。

先让我讲一下站在转得很快的圆形平台上的人所得到的感觉。旋转运动要把人抛向外面去；你站的地方离中心越远，使你倾斜和把你向外拉的力量就越大。如果闭上眼睛，你就似乎觉得并不是站在水平的台面上，而是站在一个斜面上，并且很难使身体保持平衡。为什么会这样？看一下这时候有哪些力量作用在你身上（图 34），就会明白。旋转运动把我们的身体向外拉，而重力把我们的身体向下拉。这两个力量按照平行四边形规则合在一起，使我们受到一个向下倾斜的合力。平台转得越快，这个合成运动也就越大，倾斜度也越大。

现在设想这个平台的边缘是向上弯的，并且你是站在这个倾斜的边缘上（图 35）。如果平台不动，你在这种地方就站不住脚，要溜滑或者甚至会跌倒。如果平台是在旋转的，那就是另外一回事了。这时候，在一定的速度下，这个倾斜面对你就会象是一个水平面，因为那两个作用在你身上的力的合力所指的方向也是倾斜的，并且恰好同平台的倾斜的边缘成直角。

如果旋转着的平台是这样的一个曲面，它的表面在一定的速度下处处都跟合力垂直，那末站在平台上所有这些点上的人，都会觉得自己是站在水平的平面上。用数学可以计算出，这样的曲面是一种特别的几何体——抛物体——的面。如果把一个装着半杯水的玻璃杯，绕着一个竖直轴很快地旋转，就可以得到这样的表面：这时候玻璃杯边上的水高了起来，中心的水低了下去，于是它的表面就成了抛物面。

如果不用水，而是在玻璃杯里盛上一些融化了的蜡，不断旋转杯子，直到杯里的蜡凝结成固体为止，那时候这个凝结成的表面就会是一个很精确的抛物面。这样的表面在一定的旋转速度里，对于重的物体就好象是一个水平面：放在它上面的任一点上的小球，都会留在那里，不会滚下来（图 36）。

现在就很容易理解“魔”球的构造了。

“魔”球的底（图 37）是一个很大的可以旋转的台，它的面正是一个抛物面。台的下面隐藏着机件，使它旋转得非常平稳。虽然这样，如果不使周围的物体跟着人一起移动，台上的人还是会觉得头晕的。为了使台上的人感觉不出自己是在运动，就得在这个旋转台的外面，罩一个

顺便说起，这也可以用来解释：为什么在铁路转弯的地方，外面的铁轨要比里面的垫得高一些；为什么给骑自行车的人和驾驶摩托车的人准备的车道，要朝里面倾斜一些；为什么专门长跑的人能够沿着倾斜得很利害的环形跑道跑。

用不透明的玻璃做的大球，并且让大球跟台转得一样快。

这个名字叫做“魔”球的转盘的构造就是这样。你要是站在这个“魔”球里面的台上，你会有怎样的感觉呢？它一旋转，在你脚下的地面就成了水平的。不管你是站在这个台的曲面上哪一点——台轴附近（在这里台面的确是水平的）也好，台的边缘（这里是 45° 的斜坡）也好，你都会觉得它是水平的。在你的眼睛里，这个台很明显是个曲面，可是你肌肉却感到你是站在平坦的地方。

两种感觉彼此发生着非常显著的矛盾。如果你从台的这一边走向台的那一边，你就似乎觉得整个大球好象跟一个肥皂泡一样轻，跟着你身体的重量往那一边移它就往那一边侧：因为在所有的各点上，你都觉得自己是站在水平面上。而斜着站在台上的别人的位置，在你看来，就一定显得极不平常：你会觉得这人简直象苍蝇一样在墙上走（图 38）。

如果把水泼在这个球的地面上，水就会沿着球的曲面散开来，铺成薄薄的一层。在球里的人会觉得这里的水象是站在自己面前的一堵斜墙。

普通的重力规律在这个奇异的球里好象是失去效力了。而我们也好象是到了一个童话里的奇妙的世界里……

在空中用极高速度盘旋的飞机里的飞行员也会感受到同样的感觉。举例来说，如果他用每小时 200 公里的速度沿着一个半径是 500 米的曲线飞行，那末，他一定似乎觉得地面是微微倾斜着，成了 16° 的斜坡。

为了进行科学观察工作，曾经建造了一个和这相似的旋转实验室。这是一间圆柱形的屋子，直径是 3 米，旋转速度是每秒钟 50 转（图 39 和 40）。因为实验室的地板是平的，所以在它旋转的时候，靠墙站着的观察的人似乎觉得屋子是向后斜着，因此他本人也不得不半倚在斜墙上（图 40）。

液体做的望远镜

反射望远镜上的反射镜，最好是抛物面的，也就是液体在旋转的容器里形成的那种表面的形状。制造望远镜的人要付出大量辛勤的劳动才能使反射镜有这样的表面。研磨望远镜用的反射镜的工作常常要延续好几年。美国的物理学家乌德为了解决这个困难，创造了液体镜面：他在一个大容器里旋转水银，得到一个理想的抛物面，由于水银能很好地反射光线，所以能起反射镜的作用。

这种望远镜的缺点是，稍一震动，液体镜面就会起皱纹，使映像歪曲。而且水平的镜面只能观察到天顶的天际。

“魔环”

你也许在杂技场里看到过一种使人头昏的自行车把戏：自行车手骑着车在一个圆环里从下而上绕一个整圈。他骑到这个环的上面一部分的时候，尽管头朝着下，还是骑了过去。在演技场里装着一一条木头铺的路，

中间有一个或几个环，象下页图 41 所画的那样。演员骑着车顺着环前面的一段倾斜部分冲下来，然后很快地顺着环连人带车一同向上冲去。他头朝下走完整个圆圈，安全地回到地面上。

这种稀奇的自行车把戏，在观众看来往往以为只是演员的技艺高超。观众有时候会莫名其妙地问自己：这个大胆的骑车的人头向下的时候，究竟是什么神秘力量支持他的呢？有些好疑的人甚至会疑心这也许只是一种错觉，他们说在魔术里是没有什么超自然的作用的。其实这完全可以用力学的定律来解释。假使你让一个弹子沿着这条路滚去，它也会毫不逊色地表现出同样的把戏来。在学校的物理实验室里有一种小型的“魔环”，供你用小球来做实验。

为了试验“魔环”的坚固性，可以用一个很重的球从这条环形路上滚过去。球的重量应该同演员和自行车的总重量一样大。如果球能顺利地滚过去，那末演员也就可以骑着车驶过圆环去。

读者们当然想得出这种奇异现象的原因，同那个甩着转的水桶的现象一样（第 52 页）。可是这个把戏也并不是常常能够做得成功的。必须精确地计算出自行车手的出发地点的高度。不然的话，演出的时候会出乱子的。

杂技场里的数学

我知道枯燥无味的公式如果用多了，会吓倒有些物理学的爱好者。可是拒绝从数学方面去认识各种现象的人，一定不能预见现象的过程和确定现象发生的条件。譬如说，在目前这一个例子里，只要两三个公式，就可以帮助我们精确地断定，在什么样的条件下才能成功地完成跑“魔环”那样的惊人把戏。

现在就让我们来计算一下吧。

我们用几个字母来代表要计算的一些数量：

h 代表自行车手出发地点的高度；

x 代表出发地点的那一段高度 h 里的高出“魔环”最高点的一部分高度；在图 41 里，这段距离是： $X=h-AB$ ；

代表环的半径；

m 代表自行车手和自行车的总质量；至于重量可以用 mg 来表示，这里的

g 代表地球的重力加速度，它的数值，我们知道是 9.8 每秒每秒米；

v 代表自行车在到达环的最高点时候的速度。

所有这些数值，我们可以用两个方程式把它们联系起来。首先我们从力学里知道，自行车沿着斜坡往下滑，在滑到同 B 点一样高的 C 点（这个地位在图 41 的左下角图里表明着）的时候，它得到的速度等于自行车手把车骑到环的顶点 B 的时候所具有的速度。第一种速度可以用方程式

$v = \sqrt{2gx}$ 或 $v^2 = 2gx$ 来表示。因此自行车手到达 B 点时候的速度

v 也等于 $\sqrt{2gx}$ ，也就是 $v^2 = 2gx$ 。

在这里，我们略去了旋转着的自行车轮圈的能量。但是这个因素对计算结果的影响很小。

其次，自行车手在到达圆环的最高点的时候，如果想不摔下去，他一定得在这里取得比重力加速度更大的向心加速度（第 52 页），也就是说，必须使

$$\frac{v^2}{r} > g \text{ 或 } v^2 > gr。$$

可是我们已经知道 $v^2 = 2gx$ ；所以

$$2gx > gr, \text{ 或 } x > \frac{r}{2}。$$

这样，我们知道，要顺利地做完这个希奇的把戏，就必须这样建造这个“魔环”，使这条路的倾斜部分的最高点比环的

最高点高出环的半径的 $\frac{1}{2}$ 以上，或者高出环的直径的 $\frac{1}{4}$ 以上。你看，路

的坡度在这里并没有关系——需要的只是自行车手的出发点要比环的顶点高出环的直径的 $\frac{1}{4}$ 以上。不过，自行车的摩擦力的影响在这里没有提

到：我们把车在 C 点和 B 点的速度看做是一样的。因此，决不能把路做得太长，把斜坡做得太平。在斜坡太平的情况下，由于摩擦的结果，自行车到达 B 点时候的速度就会比它在 C 点的时候小。举例来说，如果环的直径是 16 米，那末演员出发点的高度就应该不小于 20 米。如果不具备这个条件，演员的技术无论多么高明，也不能骑过“魔环”：到不了环的顶点，他必然会摔下来。

应该指出，玩这个把戏的时候，车上不必装链条，自行车手只是在重力的作用下使车前进。这时候，他不能、其实也不必要加快或减缓自己的动作。他的全部技术只是把自行车保持在路的中心线上。如果自行车稍有倾斜，他就有从路上滑下被抛向地面的危险。车在圆环里前进的速度是非常大的：在直径是 16 米的环里绕一转只要三秒钟。这已经是每小时 60 公里的速度了！用这种速度骑自行车，当然是不很容易的。可是也没有太大的困难，只要勇敢地信赖力学的定律，也就可以了。我们可以从表演这种技艺的人写的小册子里，读到这样几句话：“只要计算得正确和设备够坚固，自行车把戏本身是不危险的。这个把戏会不会发生危险，完全看演员自己。如果演员的手发抖，如果他很激动，失去了自制力，如果他出乎意料地表演得不好，那就难免会发生事故。”

根据这同一条定律的，还有大家知道的飞机翻斤斗和别种特技飞行。在翻斤斗的时候，最重要的是要驾驶员能够沿着曲线作正确的快飞，并且能够熟练地操纵飞机。

重量的短少

一个爱打小算盘的人有一天告诉大家说，他能够不用欺诈的方法就少给买主分量。这秘密就是到赤道附近地方去进货，而到两极附近去销售。大家早就知道，物体在赤道附近比在两极附近轻一些，一公斤的货物从赤道运到两极，大约会增加重量 5 克。然而在买卖的时候，不能够

使用普通的秤，而必须使用弹簧秤，并且这个弹簧秤要在赤道上制造（刻度数）。不然的话，就得不到什么好处，因为货物变重了，砝码也同样变重了。

这种投机取巧的思想当然要不得，但是这种说法倒是有科学根据的：离赤道越远，重力的确会越大。它的原因是，在地球转的时候，在赤道上的物体所绕的圆周最大，同时也由于在赤道附近地球是凸出的。

重量的短少主要是由于地球的自转，它使在赤道附近的物体的重量比同一物体在两极的时候轻 $1/290$ 。

把很轻的物体从一个纬度搬到另一个纬度，重量上的差别是很小的。可是对于庞大的物体，这个差别可以达到很大的数字。你也许想不到，譬如一艘轮船在莫斯科重 60 吨，到了阿尔汉格尔斯克会增加 60 公斤；而到敖德萨会减轻 60 公斤。从斯匹次卑尔根群岛每年要向南方各港埠运出煤 300,000 吨。假如这些数量的煤运到赤道上的某一个港埠，那末我们用从斯匹次卑尔根带来的弹簧秤来称它的时候，就会发现它已经减少了 1200 吨。一艘在阿尔汉格尔斯克重 20,000 吨的战舰，到了赤道附近的水面上，大约会减轻 80 吨。但是这并没有人能够觉出来，因为一切别的物体也相应地减轻了；海里的水当然也不例外。

假如地球自转的速度比现在快，譬如说，一昼夜的长短不是 24 小时，而是 4 小时，那末，在赤道上和在两极上，物体重量的差别就会更显著。在一昼夜只有 4 小时的情况下，在两极重一公斤的砝码，拿到赤道上会变得只有 875 克重。这正和土星上重力的情况大致相同：在这个行星的两极附近，一切物体都比它们在赤道上的时候重 $1/6$ 。

我们知道，向心加速度跟速度的平方成正比，因此就不难算出，地球要转得多快，赤道上的向心加速度才会增加到原来的 290 倍，也就是说，增加到和地球的重力加速度相等。这种情况，在自转速度等于现在的 17 倍的时候，就会出现（ $17 \times 17 =$ 大约 290）。在这种情况下，物体就不会对支持它的东西加上压力。换句话说，假如地球自转的速度等于现在的 17 倍，那末赤道上的物体就会完全没有重量。在土星上，自转的速度只要大到目前的 2,5 倍，也可以出现这样的情况。

因此，顺便说说，船只在赤道附近的水面上的吃水深度，仍旧同在两极水面上一样：虽然船只变轻了，可是被船只排开的水的重量也同样变轻了。

前面说过，物体在赤道的重量要比在两极的重量轻 $1/290$ ，而这主要是由于地球的自转，这就是说，物体在赤道上所受的向心加速度，相当于重力加速度的 $1/290$ 。那末，若把赤道的向心加速度加大到 290 倍，当然就等于重力加速度。

第四章 万有引力

引力大不大？

“如果我们不是时时刻刻都看见物体在坠落，那它对我们说来就会是一种非常奇怪的现象了，”有名的法国天文学家阿拉哥这样说。习惯使我们对地球吸引着地面上一切物体的现象，看成是非常自然而且极普通的现象。可是当有人对我们说，物体彼此间也是互相吸引着，那我们就会不十分相信了。因为在日常生活里我们没有见过类似的事情。

那末，为什么万有引力定律不在我们周围环境里经常表现出来呢？为什么我们看不到桌子、西瓜、人体互相吸引着呢？这里的原因就是，对小物体来说，引力太小了。让我们举一个明显的例子。有两个人相隔2米立着。这时候他们是互相吸引着，可是这中间的引力小极了：对中等体重的人说来，这个力量还不到 $1/100$ 毫克。这就是说，两个人彼此吸引的力量，等于一个十万分之一克的砝码压在天平盘上的力量。这样小的重量，只有科学实验室里的最灵敏的天平才能察觉出！这样的力量当然不能使我们移动地位——我们的脚跟地板之间的摩擦力阻止着我们移动。为了使我们的脚在木制的地板上移动地位（脚跟木制地板之间的摩擦力等于体重的30%），至少得用20公斤的力量。跟这个力相比较， $1/100$ 毫克的引力简直小得可笑。因为一毫克是一克的千分之一，一克又是一公斤的千分之一，所以百分之一毫克只等于那个能够使我们移动地位的力量的十万万分之一的一半！这样说来，在平常的条件下，我们一点也察觉不出地面上各种物体之间有相互吸引的作用，又有什么奇怪呢？

假使没有了摩擦，事情就不同了。这时候甚至连最弱的引力也会使物体相互接近。不过在 $1/100$ 毫克的引力下，两个人接近的速度应该是非常小的。可以算出，在没有摩擦的情况下，相隔两米站着的两个人，在第一小时会彼此相向移动3厘米；在第二小时，他们会再接近9厘米，第三小时再接近15厘米。他们的运动越来越快，但是要这两个人紧紧地靠拢，至少要经过5小时。

地面上各种物体之间的引力，在摩擦力并不造成阻碍作用的情况下，也就是说在物体平衡的情况下，是可以发觉出来的。挂在线上的重物，是处在地球引力的作用下的，所以那条线会指向下面。但是在这个重物的附近，如果有个很大的物体在把重物吸向自己方面，那末，这条线就会略微偏离竖直的方向，而指向地球引力和另外那个物体的很小的引力所合成的合力的方向。在大山附近，铅锤会偏离竖直线，这种现象是在1775年第一次观测到的；那时候在同一座大山的两侧，测定铅锤的方向和指向星空的极的方向之间的角度，发现两侧的角度不一样。后来，又用了有特殊装置的天平对地面上各种物体之间的引力做了更加完善的实验，才精确地测定了万有引力。

在质量不大的物体之间，引力是非常小的。质量加大的时候，引力是跟质量的乘积成正比的。不过有许多人常常夸大这个力。有一位科学家，固然他不是物理学家而是动物学家，曾经想说服我，说那常常在海船之间看见的相互引力，也是万有引力的结果！不难算出，万有引力在

这里是一点关系也没有的：两只各重 25,000 吨的大轮船，在相距 100 米的时候，相互吸引的力量不过 400 克。不用说，这样小的力量是不能使这两只轮船在水里作哪怕是很小的一些位置移动的。轮船之间的这种谜一般的引力的真正原因，我们在以后讲流体特性那一章里再讲。

对质量不大的物体说来是非常小的引力，在庞大的天体之间却变得很大了。因此甚至是那离开我们极远的行星——海王星，它几乎是在太阳系的边上慢慢地绕转着的，也能使我们地球受到 1800 万吨的引力！虽然太阳离我们远得不可思议，可是也只是由于太阳的引力，才使地球能够维持在自己的轨道上（图 42）。假如太阳的引力由于某种原因消失了，那我们的地球就要沿着轨道的一条切线飞入无边无际的宇宙空间去，永远不再回头了。

从地球到太阳的一条钢绳

让我们想象，太阳的强大引力由于某种原因真的消失了，那地球就要面临一个悲惨的命运，永远向那寒冷而且幽暗的宇宙深处飞去。你可以想象一下——这里需要幻想，——假定工程师们决定要用实在的链条来代替那看不见的引力的链条，或者说，他们干脆想用结实的钢绳把地球跟太阳连起来，使地球留在圆形的轨道上绕着太阳转。真的，有什么东西比每平方毫米能经受住 100 公斤拉力的钢更坚强的呢？那就让我们想象一条直径是 5 公里的大钢柱吧。它的切面，用整数来说，是 20,000,000 平方米，所以只有用重 2,000,000,000,000 吨的重物才能把这根柱子拉断。我们再想象用这样的钢柱从地球上伸到太阳里，使两个天体连在一起。你知道得用多少根这样的大柱子，才能把地球维系在自己的轨道上？得用二百万根！为了使更清楚地想象这一个分布在大陆和海洋上的钢柱的森林有多么密，让我再补充一句：假定所有钢柱都均匀地分布在面向太阳的那半个地球的表面，那相邻的各根钢柱之间的空隙，只比钢柱本身略微宽一些。这样大的一座钢柱的森林，你想象一下得用多大的力量才能把它拉断，从这里你就可以想象得出，太阳和地球之间的看不见的相互引力有多强。

可是这样大的力量用来使地球的路线发生弯曲，也只是迫使地球每秒钟离开切线 3 毫米。由于这个缘故，地球所走的路线成了一个封闭的椭圆形。3 毫米只有书上一个铅字那么高。强迫地球每秒钟移动这些路，就需要这么大的力量，这不是怪事吗！然而这却可以说明地球的质量有多么大，即使用这样大的力量也只能使它移动这样不大的一些距离。

能不能躲开万有引力？

现在让我们幻想：假如太阳和地球之间的相互引力消失了，那会发生些什么情况呢：地球摆脱了那看不见的引力的链条以后，就会飞向无边无际的宇宙深处。现在让我们来幻想另一个题目：如果重力没有了，地面上的一切物体会变成什么样一种情况呢？那时候，什么东西也不能停留在地球上，只要轻轻一推，它们就会向星际空间飞去。然而也不必等到推动，地球的自转就会把一切跟地球表面没有牢固地联结在一起的

东西抛到空中去。

英国作家威尔斯就曾经用这一类的想法写了一本月球旅行的幻想小说。在《月球上的第一批人》这篇作品里，这位聪明的小说家提出了一种在行星之间旅行的非常奇怪的方法。原来这篇小说的主角是一位科学家，他发明了一种有奇异性能——能够阻止万有引力通过——的物质。如果在任何物体下面涂上一层这样的物质，那它就能摆脱地球的引力，而只受到别的物体的引力的作用。这种幻想的物质，威尔斯给它取名叫“凯伏利特”，是用那个假想的发明人凯伏尔的名字来命名的。

这篇小说的作者写道：

我们知道，万有引力或重力是能够透过一切物体的。你可以设下障壁去截断光线，使它射不到物体上面；你可以利用金属片来保护物体，使无线电波达不到它。可是你一定找不到一种障碍物可以用来保护物体，使它不受太阳的引力或地球的重力的作用。在自然界里为什么找不到那种能截断引力的障碍物，那很难说。可是凯伏尔不相信这种透不过引力的物质一定不能存在。他认为自己一定能够用人工方法创造出这样一种能够截断引力的物质。

每一个只要有一些幻想能力的人，就很容易想象出：有了这种物质，我们就能得到一种很不平凡的能力。举例来说，如果要举起一个重物，那就不必管这个重物有多重，只要在它下面铺一张用这种物质制的薄片，就能把它象稻草一样地举起来。

有了这种奇妙的物质以后，小说里的主角就要制造一个飞行器，准备大胆地坐在里面飞到月球去。这个飞行器的构造不很复杂，里面什么发动机件也没有，因为它是利用天体的引力来移动的。

下面是关于这个幻想的飞行器的描写。

设想有一个球形的飞行器，里面相当宽大，容纳得下两个人和他们的行李。飞行器有里外两层壳，里面一层用厚玻璃做，外面一层用钢做。飞行器里可以放压缩空气、浓缩食品、做蒸馏水用的仪器。整个钢球外面要涂上一层“凯伏利特”。里面的玻璃壳除了舱门以外，都密实无缝。外面的钢壳却是一块块拼起来的，每一块都能够象窗帘一样卷起来。这是很容易用特制的弹簧来制造的。窗帘可以在玻璃壳里通过白金导线用电流来卷起和放下。可是这些都已经都是技术上的细节。主要的是飞行器的外壳好象都是用窗子和“凯伏利特”的窗帘组成的。在全部窗帘都放下来遮得极严密的时候，不论是光线，不论是哪一种辐射能或是万有引力都透不进球里来。可是你想象：有一个窗帘卷起来了。这时候，远处任何恰好正对这个窗口的一个大物体，都会把我们吸引过去。这样，我们实际上就可以在宇宙空间随意旅行；一会儿让这个天体来吸引我们，一会儿让另一个天体来吸引我们，结果我们要上哪儿，就可以上哪儿。

威尔斯小说里的主角是怎样飞上月球的？

威尔斯把这个星际旅行的交通工具从地面出发的情形描写得非常有趣。涂在飞行器外面的那一薄层“凯伏利特”，使它变得好象完全没有

重量了。要知道，没有重量的物体是不能平静地耽在大气海洋的底层的；象湖底的软木塞会很快浮上水面一样，这个没有重量的飞行器也会很快被地球自转的惯性抛到大气海洋的上层去。它浮出了大气的边界以后，就要自由地继续在宇宙空间旅行。小说里的主角们正是这样飞走的。到了宇宙空间以后，他们一会儿开这些窗，一会儿开那些窗，使飞行器的内部一会儿受到太阳的引力，一会儿受到地球或月球的引力，结果他们就到达了月球的表面。后来，这些旅行家当中有一个人，又坐了这个飞行器回到了地球上。

在这里我不打算分析威尔斯的见解实质上什么样，我准备在另一本书里谈到它，并且说明它为什么是毫无根据的。现在姑且让我们相信这位聪明的小说作者，并且跟着他笔下的英雄们到月球上去。

月球上的半小时

现在让我们看威尔斯这篇小说里的主人公，来到一个重力比地球上要小得多的世界以后，曾经有过什么样的感觉。

请你读一下《月球上的第一批人》这本小说里的最有趣的几段话，这是一个刚到过月球的地球上居民的代表说的。

我于是旋开了飞行器的舱门，跪着把上身伸到舱外去：在下面离我的头三英尺远的地方，有一片从来没有人践踏过的月亮上的雪。

凯伏尔用被褥裹着身体，坐在舱边上，开始小心地把两只脚放下去。在把脚放到离地面半英尺高的时候，他迟疑了一会儿，最后还是溜到了这个月球世界的地面上。

我隔着圆球的玻璃外壳望着他。只见他走了几步，站了一会儿，四面望了望，然后决定向前跳。

玻璃歪曲了他的动作，但我觉得他实际上是跳得太快了些。凯伏尔一下子就出现在离我6 - 10米远的地方。他站在一块岩石上向我做手势；可能他还正在高声叫我呢——我却听不到声音……可是他为什么要跳着走呢？

因为莫名其妙，我也就爬出舱口，跳了下去。我觉得我似乎是落在雪洼的边缘上。走了几步以后，我也开始跳了。

我觉得我似乎在飞，很快就到了凯伏尔站着等我的那块岩石附近。抓住了岩石以后，我感到非常恐慌。

凯伏尔弯着腰，用尖锐的声音向我大叫，要我小心些。

我本来已经忘记了月球里的引力只有地球上的1/6。现在实际的情况提醒了我。

我抑制着自己的动作，小心地爬到了岩石的顶上。我好象患了风湿病那样，慢慢地走去，走到阳光下面，同凯伏尔站在一起。我们的飞行器正躺在那正在融化的雪堆上，离我们大约有30英尺。

“你看，”我转过身来对凯伏尔说。

指《行星际的旅行》。

这里所引的段落里，已经把不大重要的地方删去了。

可是凯伏尔忽然不见了。

我呆立了一会，对这件意外的事情觉得非常诧异。后来我想看看岩石外边的情形，就急忙向前走去，却忘了自己是在月球上。我那时候所用的力量，如果还是在地球上，只能使我移动一米。但是在月球上却使我移动了6米。我发现自己已经一步跨到了岩石边外5米的地方了。

我感到了一种应当在梦里才能有的飞翔在空中的感觉；在落下来的时候，我感到自己好象是落到了深渊里一样。人在地球上往下落的时候，第一秒钟大约落下5米，可是在月球里，第一秒钟只能往下落80厘米。这就是为什么我能够很平稳地向下飞9米的缘故。我似乎觉得这次降落的时间很长，大约延续了3秒钟。我在空中飘着，象羽毛一样平稳地往下落，落到了那岩石嶙峋的山谷的底上，齐膝盖没在雪堆里。

“凯伏尔！”我环视了四周，大声叫着。但是连凯伏尔脚印都没有发现。

“凯伏尔！”我更高声地叫着。

突然，我看到了他：他站在离我大约20米的一个光秃秃的峭壁上，笑着向我做手势。我不能听清楚他的话，可是懂得他手势的意义：他叫我向他那里跳去。

我有些犹豫不决：我似乎觉得距离太远了一些。可是我立刻想到，凯伏尔能够跳到这么远的地方，我大概也能跳到那里。

我就后退一步，用足气力向前跳。我象箭一样飞入了空中，似乎再也落不下来。这是一次神秘的飞行，奇怪得好象在做梦一样，可是同时也使我感到非常愉快。

我跳的时候似乎用力太大了：一下子就飞越过了凯伏尔的头顶。

在月球上打靶

苏联科学家齐奥尔科夫斯基写过一篇中篇小说，叫做《在月球上》。从这篇小说里摘下一些段落来，可以帮助我们理解在重力作用下运动的条件。在地面上，大气妨碍着物体在它里面运动，因此本来很简单的物体坠落的定律，因为有了许多附加条件而变得复杂起来。在月球上是基本没有空气的。因此，如果我们真的能够到月球上去进行科学研究，那它一定会是一个最好的研究物体坠落的实验室。

在摘录小说里的故事以前，让我先介绍两个在故事里交谈着的人：他们都在月球上，正在研究枪里放出的子弹，在月球上是怎样运动的。

“可是，火药在这里能不能起作用呢？”

“爆炸物在真空中甚至比在空气里威力更大，因为空气只会阻碍火药爆炸开来；至于氧气，那它是不必要的，因为火药本身所含的氧已经足够了。”

“我们把枪口朝上放，以便子弹射出去以后可以在附近找到……”

一道火光，微弱的声音，地面微微有些震动。

“枪塞到哪里去了？它应当就在这里附近。”

“枪塞是跟子弹一起飞出去的，它大概不会落在子弹的后面。因为

这里的声音不是经过空气而是经过土地和人体传来的；在月球上是没有空气的。

在地球上大气阻挠它跟着子弹一起飞走；而在这里，就是羽毛落下和飞向空中的速度，也和石头一样。你拿一片从枕头里掏出来的羽毛，我拿一个小铁球。你能够象我用小铁球一样方便，用手里的羽毛击中一个靶子，甚至是离得很远的靶子。在这种重力很小的情况下，我能够把小球掷到 400 米远；你也能够把羽毛掷过同样的距离；固然你掷的东西是不会打坏任何东西的，甚至在掷的时候，你也感觉不到你是在掷什么东西。我们两个人力气差得不多，让我们用全力把手里的东西掷向同一个目标：就掷向那块红色花岗石吧……”

结果羽毛好象被强烈的旋风刮着一样，略微赶在铁球的前面。

“可是这是怎么回事呢？从开枪到现在已经有三分钟了，子弹却还没有下来！”

“大概再等两分钟，它一定会回来的。”

果然，两分钟以后，我们觉得地面微微有些震动，同时在不远的地方，看到那个正在跳着的枪塞。

“这颗子弹飞出去的时间真长啊！它能升得多高呢！”

“七十公里。因为这里的重力小，并且没有空气阻力，所以子弹能够飞得这么高。”

现在让我们来验算一下。如果子弹离枪口时候的速度是每秒 500 米（这相当于新式枪的 $2/3$ ）。那末，在地球上没有空气的情况下，这颗子弹的上升高度是：

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{500^2}{2 \times 10} = 12,500 \text{米},$$

也就是 12.5 公里。而在月球上，重力只有地球上的 $1/6$ ，这里的 g 就只有 $10/6$ ；因此，子弹在月球上能够飞到的高度是

$$12.5 \text{公里} \times 6 = 75 \text{公里}。$$

无底洞

地球的核心部分是什么东西组成的，现在还知道得很少。有些人认为在几百公里厚的坚硬的地壳下面，就是炽热的液体。有些人认为整个地球一直到中心都是凝固的。要解答这个问题比较困难，因为现在最深的矿井也只有 7.5 公里深（人迹能到的最深的矿井更浅，只有 3.3 公里），而地球的半径却是 6400 公里。如果能够沿着地球的直径钻一个洞一直穿过它，那不用说这种问题就可以解决了。可是现在的技术还远不能实现这样的计划——虽然现在在地壳上所凿的井的总的长度已经超过了地球的直径。关于穿过地球钻凿地道的事，十八世纪的数学家莫泊丢和哲学家伏尔泰曾经想过。已故的法国天文学家佛兰马理翁曾经把这个计划重新提了出来（当然是另一个计划，规模也比较小）。在那篇专讲这个题目的文章的前面，有一幅图画，现在让我们把它复制在这里（图 43）。当然，象这一类的事情，直到现在还没有人做过；不过我们可以想象有

波克斯堡（在南非洲的德兰士瓦）的一个金矿，矿井口高出海平面 1600 米，这就是说，从海平面算起的矿井深是 1700 米。

这么一个无底洞，用来研究一个有趣的问题。如果你落进了这样一个无底洞，你想你会怎么样呢（暂时让我们忘记空气的阻力）？和洞底相撞是不会的，因为这里没有底。那末，你会停留在哪里呢？

停留在地球的中心吗？不会的。

当你落到地球中心的时候，你的身体下落的速度会有这样大（大约每秒钟 8 公里），使你根本没法停留在这一点上。你会继续不断向前飞去，运动速度逐渐变慢，一直飞到洞的另一端的边缘。到了这里，你就应当牢牢地抓住洞边，不然你又要落进洞里，再来一次穿洞旅行，在洞的另一端出现。如果在那里你还是抓不住任何东西，那你又会重新落进洞里，就这样来回摆动，没完没了。力学告诉我们，在这种条件下（让我再说一次，如果不计算洞里空气的阻力），物体应当不停地来回摆动。

这样穿洞一次，需要多少时间呢？整个路程来回一次需要 84 分 24 秒，用整数来说，大约是一小时半。

佛兰马理翁接下去说：

如果这个洞是顺着从一个极到另一个极的地轴掘的，情况就会象上面说的那样。可是，如果我们把出发点移到别的纬度上，移到欧洲、亚洲或非洲大陆上，那末就得把地球自转的影响也计算进去。大家知道，地球表面上的每一个点都在奔跑。赤道上的各点每秒钟跑 465 米，而在巴黎的纬度上，每秒钟跑 300 米。由于离地球的自转轴越远，圆周的速度越大，所以扔进洞里的小铅球不会笔直地落进去，而要略微偏向东面。因此如果在赤道上挖掘无底洞，就应该把它掘得极宽，或者掘得十分倾斜，因为从地面落下的物体所走的路，会远远离开地心而偏向东面。

假使洞的入口是在南美洲的一个高原上，这个高原的高度假定是两公里，而洞的对面那一端是在海面上，那末，因为不小心而落进美洲那一端洞口的人，在到达对面洞口时候的速度，一定可以使他在出洞口以后再向上飞两公里。

如果洞的两端都在海面上，那末那个穿洞的人在洞口出现的时候，飞行速度已经等于零，我们就可以伸出手去接住他。而在前一种情况下，我们应当小心地闪在旁边，免得和那位飞得极快的旅行家相撞。

童话里的道路

从前，列宁格勒出现过一本书名很奇怪的小册子，叫做《彼得堡和莫斯科之间的自动地下铁道。一本还只写成三章、未完待续的幻想小说》。这本小册子的作者提出了一个聪明

图 45. 如果在列宁格勒和莫斯科之间挖掘一条隧道，那末火车就能不用火车头，靠本身的重量在里面往返行驶。的计划，当时凡是爱好物理学上的奇异现象的人，都对这个计划感到兴趣。

他的计划，“不多不少，只是挖掘一条 600 公里长的隧道，把俄国新旧两个首都用一条笔直的地下线路连接起来。这样，人类就第一次有可能在笔直的道路行走，而不必象过去那样走弯曲的道路了”（作者的意思是，我们所有的道路都是沿着弯曲的地面筑成的，所以都是呈弧

形的，而他所设计的隧道却是笔直的，是沿着一条弦行进的）。

这样的隧道，如果真的能掘成，一定会有一种世界上任何道路所没有的奇异的性能。这种性能就是：任何车辆在这样的隧道里都能自己行动。

让我们回想一下刚才讲过的贯通地球的无底洞吧。从列宁格勒到莫斯科的隧道也是这样的一个无底洞，只是它不是沿着地球的直径，而是沿着地球的一条弦挖掘的。的确，在你看图 45 的时候，你会觉得这个隧道是水平的，火车一定不能利用重力在里面行驶。可是这只是你的错觉：你可以想象朝着隧道的两端画两条地球的半径（半径的方向就是竖直线方向）；这时候你就会看出隧道并不和竖直线方向成直角，也就是说不是水平的，而是倾斜的。

在这样的斜隧道里，所有物体都会在重力的作用下来回移动，并且总是紧贴着隧道的底部。如果在隧道里建筑铁道，那末火车就会在里面滑着行驶：车身的重量代替了火车头的牵引力。一开始，火车走得很慢。以后自动火车的速度就越来越高；不久速度就达到了难以想象的大小，终于使隧道里的空气会显著地妨碍着火车的运动。现在让我们暂时忘掉这种空气障碍物——正是它使我们的许多吸引人的计划无法实现——而继续研究火车的行驶。火车在接近隧道中点的时候，就达到了极大的速度——比炮弹还要快几倍！这样的速度几乎可以使火车一直开到隧道的另一端。假如没有摩擦力，那就连“几乎”这两个字也用不着了：火车不用火车头，会自己从列宁格勒一直开到莫斯科。

火车这样走一趟所需要的时间，同物体穿过沿着地球直径挖掘的无底洞所需要的时间一样：42 分 12 秒。非常奇怪，时间的长短竟跟隧道的长短没有关系；从莫斯科到列宁格勒，从莫斯科到海参崴，或者从莫斯科到墨尔本，都需要同样的时间。

任何别的车辆——摇车、马车、汽车等——所需要的时间也都是这样。这种童话式的道路并不象童话里说的那样它本身会移动，可是所有的车辆却可以在它上面自动地疾驰，用难以想象的速度从一端驶向另一端！

怎样挖掘隧道？

请看图 46，上面画的是修筑隧道的三种方法。你说哪一条是水平地掘过去的？

不是上面一条，也不是下面一条，而是沿着弧线挖掘的中间那一条。在这条弧线上的所有各点都跟竖直线（或地球的半径）成直角。只有它才是水平的隧道——因为它的曲度完全跟地面的曲度相符合。

通常大隧道都是照图 46 的上面那个图的样子建造的：它是沿着跟隧道两端的相切的那两条直线走的。这样的隧道，开始微微向上升起，后来又微微向下斜。它的好处是里面不会积水，水会自己流出洞口来。

假如隧道是严格地按照水平的方向建造的，那末长隧道就成了弧

还有一件有关无底洞的奇异的情况，就是物体在无底洞里往返所需要的时间，跟行星的大小无关，只跟它的密度有关。

形。里面的水也就不会向外流，因为隧道里每一点的水都是在平衡的状态中。这样的隧道长度超过 15 公里的时候（例如瑞士新普伦隧道就长达 20 公里），你就不能站在隧道的一头看到它的另一头：你的视线被隧道的顶遮断了，因为这样的隧道的中点要比它的两端高出 4 米以上。

最后，如果沿着一条接连隧道两端的直线来建造隧道，那就会从两端微微地向中点倾斜。这时候水不但不能向外流，并且相反地会积在中间它的最低的部分。可是如果你站在这种隧道的一端，却可以望见它的另一端。从附图里就可以看出这一点。

从以上所说的看来，一切水平线都是弯曲的，直的水平线是不可能有的。反过来，竖直线却一定是直的。

第五章 乘着炮弹旅行

在结束关于运动和引力定律的讲话以前，让我们来研究一下在月球上的幻想旅行，这在儒勒·凡尔纳所写的两部小说《炮弹奔月记》和《月球旅行记》里有非常有趣的描写。读过他的小说的人一定记得，随着北美战争结束，巴尔的摩尔大炮俱乐部里几个会员闲着没事干，决定铸造一门巨炮，使炮里可以装进一颗极大的、里面坐得下旅客的空心炮弹，用大炮把这个炮弹车厢射到月球去。

这个想法是不是荒诞无稽的呢？首先：能不能给物体这样一种速度，使它离开地球表面不再回来呢？

牛顿山

现在先引发现万有引力定律的牛顿的几句话。他在自己所著的《自然哲学的数学原理》里说道（为了容易懂，这里只意译了他的原文）：

掷出去的石块在重力作用下，会离开直线方向而走一条曲线落到地上。石块掷出去的速度大一些，它就飞得远一些；因此它也可能依一条长到十英里、一百英里、一千英里的弧线，甚至会飞出地球界限而不再回来。设 AFB（图 47）是地球的表面，C 是地球的中心，UD，UE，UF 表示从很高的山顶上向水平方向掷出的物体在速度一次比一次大的情况下所走的几条曲线。我们在这里不考虑大气的阻力，也就是假定大气是完全不存在的。在初速不大的情况下，物体走的是曲线 UD；速度大一些，就走 UE，更大一些，就走 UF，UG。在速度达到某种程度的时候，物体就要环绕整个地球转一周，又回到投掷它的地方。因为在物体回到出发点的时候速度并不比当初掷出它的时候小，所以这物体又会沿着这条相同的曲线继续向前运动。

假如在这座想象的高山顶上有一门炮，那末从炮里射出的炮弹，只要速度高到一定的程度，就会不再回到地球上，而要不停地绕着地球转。利用十分简单的算法 不难算出，在炮弹的速度达到大约每秒钟 8 公里的时候，就会出现这种情形。换句话说，从炮里射出的炮弹，如果速度高到每秒钟 8 公里，它就会永远离开地面，成了地球的一颗卫星。这颗卫星运动的速度是赤道上任何一点的速度速度的 17 倍，在 1 小时 24 分里环绕地球一周。假如使这颗炮弹有更大的速度，那它绕着地球转的路线就不再是一个圆，而是一个多少拉长了的椭圆，椭圆的一端可以离开地球很远。炮弹的初速度如果比这还大，那它就要永远离开地球而飞向宇宙空间去。这只要使炮弹的初速度达到大约每秒钟 11 公里就可以了（所有这些讨论都是假定炮弹是在真空中，而不是在空气里运动的）。

现在让我们看看，用儒勒·凡尔纳所建议的方法，能不能实现这种想法。现代的大炮不能使炮弹在第一秒钟的速度超过每秒 2 公里。这只等于飞上月球所需要的速度的 $1/5$ 。但是小说里的那些主人公却认为如果他们能够造成一门极大的炮，再装上大量的火药，就可以得到很高的速度，把炮弹射到月球去。

幻想的大炮

于是那些大炮俱乐部的会员铸了一门巨炮，它身長 250 米，竖直地埋在地下。又造成了大小相当的炮弹，在它里面有客舱。弹的重量是 8 吨。炮里装有火药——火棉——160 吨。火药爆发以后，如果我们相信小说家的话，炮弹得到了每秒钟 16 公里的速度，但是由于空气的摩擦，这个速度减小到 11 公里。这样，儒勒·凡尔纳的炮弹飞出了大气界外以后的速度，还足够使它飞到月球上去。

小说里就是这样说的。这在物理学上应该怎样说呢？

儒勒·凡尔纳的设计站不住脚的地方，完全不在通常会使

读者发生怀疑的那一点上。第一，可以证明用火药的大炮永远不能使炮弹得到每秒钟 3 公里以上的速度（这一点在我的《行星际的旅行》那本书里有证明）。

此外，儒勒·凡尔纳没有估计到空气的阻力，而这在炮弹的速度达到这样高的情况下，可能会大大地甚至完全改变炮弹飞行的路线的。即使连这些也撇开不谈，这个乘炮弹飞向月球的设计，还是有严重的破绽。

这个设计对旅客说来危险性极大。你别以为危险要在从地球飞到月球的那一段时间里发生。假如旅客们能够活着离开炮口，那末在以后的旅程当中实在是一点危险也不会有。旅客乘着炮弹在宇宙空间里奔驰，速度虽然很大，但这对他们却没有害处；正象地球绕着太阳转的速度比这还大，却对地球上的居民一点没有害处一样。

沉重的帽子

对我们旅客说来，最危险的时候是炮弹在炮膛里运动的那百分之几秒钟里。因为在这样短促的时间间隔里，旅客在大炮里运动的速度要从零增加到每秒钟 16 公里。难怪小说里的旅客们在等待开炮的时候是这样地发着抖。巴尔比根肯定说，在炮弹射出的时候，坐在炮弹里面的旅客所遇到的危险，并不比立在炮弹前面的人小，这是完全正确的。的确，在发射炮弹的时候，在客舱底部从下面来的打击旅客的力量，跟在炮弹行进路线上的任何被击中的物体所受到的力量一样大。小说里的主人公把危险看得太小了，他们认为，在最坏的情况下，只不过是头上出些血……

实际上情况是很严重的。炮弹在炮膛里是加速运动着的：火药爆发的时候所形成的气体的不断的压力会使炮弹的速度加大。在一秒钟的极小一段时间里，它要从零增大到每秒钟 16 公里。为了简单起见，让我们假定这里的速度是均匀地增加着的。这样，为了要在这么短的时间里使炮弹的速度增加到每秒钟 16 公里，你就得用一种加速度，它的数值，用整数来说，达到 600 每秒每秒公里（算法见 93 页）。

你知道地球表面上的普通重力加速度只有 10 每秒每秒米，那就可

让我补充一句，一辆竞赛用的汽车，在它开始迅速运动的时候，加速度是不会超过 2 - 3 每秒每秒米的；
一列平稳地开出车站的火车，它的加速度不超过 1 每秒每秒米。

以完全懂得这个数字的严重意义了。由此可见，炮弹里的每一个物体在发炮的时候加在舱底上的压力，会是这个物体的重量的 60,000 倍。换句话说，旅客们会感觉到他们好象比平时重了几万倍！在这样巨大的重力作用下，他们立刻会被压死。巴尔比根先生的一顶大礼帽在发炮的那一瞬间会重到 15 吨（一辆满载货物的火车厢的重量）。这样的礼帽一定会把它的主人压成肉饼。

的确，小说里也曾经提到过一些减轻撞击的方法：在炮弹里装上有弹簧的缓冲装置和装上在两个底之间的空间满盛着水的夹底。这样，撞击的时间就略微延长了一些，因而速度的增加也缓慢一些。可是在这样大的力量作用下，这些装置的效用实在太小了。把旅客压向地板的力量也许会减小一些，可是一顶重 15 吨或 14 吨的礼帽不是同样会把人压死的吗？！

怎样减轻震动？

力学告诉了我们怎样来缓和速度的急剧增加。

如果把炮筒加长许多倍，就可以做到这一点。

不过如果我们想在放炮的时候，使炮弹里面的“人造”重力和地球上的普通重力相等，那就得把炮身造得非常长。一个大致的计算表明，为了做到这一点，必须把炮身不多不少恰恰加长到 6000 公里。换句话说，儒勒·凡尔纳的“哥伦比亚”号大炮应当向地球内部伸去，一直伸到它的正中心……这时候，炮弹里的旅客才能够摆脱所有不舒服的感觉：加在他们身上的除普通重量以外，只有由于速度慢慢增加而产生的极微的重量；他们觉到的全部重量只比以前增加一倍。

不过，人体在极短的时间里，是受得住比平时大几倍的重力而不受损害的。当我们坐着雪橇从冰雪的山上滑下来在途中很快地改变自己运动方向的时候，我们的重量在这一瞬间会显著地增加，也就是说，我们的身体会比平时更有力地压在雪橇上。重力增加到三倍是不会感到很不舒服的。如果我们假定人在很短的时间里能够承受住甚至是十倍的重量，那末，铸造一门长 600 公里的炮，也就够了。不过这也没有什么可以高兴的，因为就是这样的炮，在技术上也是不可能制造的。

你看，只有在什么样的条件下，儒勒·凡尔纳的引人入胜的设计——乘坐炮弹飞向月球——才有在想象中实现的可能。

你想自己来算一算吗？

在这本书的读者当中，一定可以找到一些人，想自己验算一下上面所提到的那些数字。这里我就把这些算法介绍一下。当然，所得出的数值只是近似的，因为这里所根据的是：假定炮弹在炮膛里是按照均匀的

儒勒·凡尔纳在小说里描写飞行炮弹的内部条件的时候，曾经有过一种重要的疏忽，关于这，著者在《趣味物理学》前编里已经详细讲过了。这位小说家没有考虑到，炮弹射出以后，炮弹里的一切东西在整个飞行期间完全失掉了重量，因为引力使炮弹和炮弹里的一切东西得到了相同的加速度（再参看后文“儒勒·凡尔纳小说里漏写的一段”那一节）。

加速度运动的（实际上速度的增加不是始终相等的）。

要做这种计算，必须用下面两个有关匀加速运动的公式：

在 t 秒钟末的时候，速度 v 等于 at ，这里的 a 代表加速度：

$$v = at ;$$

在 t 秒钟里所经过的距离 S ，可以用下面的公式求得：

$$S = \frac{1}{2}at^2。$$

让我们先用这两个公式来求得炮弹在“哥伦比亚”号大炮的炮膛里向前滑进的加速度。

小说告诉我们，那门大炮没有装火药的炮膛部分是 210 米，这也就是炮弹要走的路 S 。

我们也知道，最后的速度 $v = 16,000$ 米 / 秒。有了 S 和 v 的数值，我们就可以求得 t ——炮弹在炮膛里运动的时间了（把这运动看做是一种匀加速运动）。既然

$$v = at = 16,000 ,$$

$$\text{那末, } 210 = S = \frac{at \cdot t}{2} = \frac{16,000t}{2} = 8000t ,$$

$$\text{因此, } t = \frac{210}{8000} = \frac{1}{40} \text{ 秒。}$$

炮弹在炮膛里显然只走了 $\frac{1}{40}$ 秒！把 $t = \frac{1}{40}$ 代到公式 $v = at$ 里，可以得出

$$16,000 = \frac{1}{40}a ,$$

因此 $a = 640,000$ 米 / 秒²。

可知炮弹在炮膛里运动时候的加速度是 640,000 米 / 秒²，也就是说，比重力加速度大 64,000 倍。

应当用多少长的炮膛才能使炮弹的加速度只是重力加速度的 10 倍，也就是 100 米 / 秒²呢？

这是一个把我们刚才的算法倒过来算的问题。已知： $a = 100$ 米 / 秒²， $v = 11,000$ 米 / 秒（在没有大气阻力的情况下，这样的速度是足够的）。

从公式 $v = at$ ，我们得出 $11,000 = 100t$ ，由此可以算出 $t = 110$ 秒。

从公式 $S = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}at \cdot t$ ，我们得到炮膛的长度应当是

$$\frac{11,000 \times 110}{2} = 605,000 \text{ 米，用整数来说，就是 600 公里。}$$

这样算出来的一些数字，就可以驳倒儒勒·凡尔纳小说里的引人入胜的计划。

第六章 液体和气体的性质

不会淹死人的海

人们从古代起，就已经知道世界上有不会淹死人的海。这就是有名的死海。死海里的水非常咸，任何生物都不能在里面生活。炎热而又不下雨的巴勒斯坦的气候，使海面的水发生剧烈的蒸发作用。可是蒸发掉的只是些纯水，至于溶解在里面的盐却还是留在海里，因此，盐的浓度越来越大了。这就是为什么死海里的水的含盐量不跟大多数海和洋一样只有 2 - 3%（照重量计算），而是有 27% 以上，并且还随着水的深度而加大的缘故。这样，死海里所含的物质当中，就有四分之一是溶解的盐。这里的盐的总含量，据估计大约有 4000 万吨。

由于这样高的含盐量，死海就有了一种有趣的特征：这里的水比普通的海水重得多。在这样重的液体里，人不会沉下去：人体比它还要轻。

我们身体的重量比相同体积的浓盐水要轻得多，所以按照浮体的规律，人不可能在死海里下沉；人会浮在水面上，象鸡蛋会浮在盐水上一样（鸡蛋在淡水里会下沉）。

幽默作家马克·吐温游历了死海以后，曾经用有趣的笔调描写了他和他的同伴们在死海的很重的水里洗澡的时候所得到的异常的感觉：

这是一次有趣的沐浴！我们竟不会沉下去。在这里，我们可以把身体完全伸直，并且把两手放在胸部，仰卧在水面上，而大部分身体却仍旧在水面上。这时候我们还可以把头完全抬起来……你能够很舒服地仰卧着，把两个膝盖抬到下颚下面用双手抱住它们——不过这样会使你很快就翻一个斤斗，因为头部太重了。你可以头顶着海水竖起来，使自己从胸膛中部到脚尖这一段身体露在水上面，不过你不能长久地保持这种姿势。你不能仰游得很快，因为你的脚完全露在水面上，只好用脚跟推水。如果你俯着身体游泳，那你就不能前进，反而要后退。马在死海里既不能游泳，也不能直立，因为它的身体太不稳定了——它一到水里，只能侧着身体躺在水面上。

在图 48 里，你可以看到一个人很舒服地躺在死海的水面上。水的比较大的比重能使他用这种姿势看书，并且拿着伞遮住炽烈的阳光。

卡拉博加兹湖湾（里海的一个海湾）里的水和含盐量达到 27% 的埃尔唐湖里的水，都有这种特别的性质。

进行盐水浴的病人，也常常有这一类的经验。如果水的含盐量太大——譬如象斯达罗露斯克矿水那样，病人就必须使用很大的力气，才能使自己的身体贴在浴盆底上。我曾经听到过一位在斯达罗露斯克疗养的妇人生气地埋怨说，水老是把她从浴盆里往外推。显然，她认为这是疗养院管理人员的过失……

在不同的海里，水的含盐量也是各不相同的。由于这个缘故，船身的吃水深度也不一样。读者当中也许有人曾经在船的侧面吃水线附近看到过一种叫做“鲁意记号”。这种记号就是用来标明船在各种密度的水

里的最高吃水线的。例如图 49 画的满载记号，就是船只满载时在各种海水里的最高吃水线：

在淡水里 (Fresh Water)FW
在印度洋，夏季 (India Summer)IS
在咸水里，夏季 (Summer)S
在咸水里，冬季 (Winter)W
在北大西洋，冬季 (Winter North Atlantic)WNA

最后还应该指出，在不久以前又发现了另外一种水，这种水的不含杂质的纯态，比普通水要重：它的比重是 1.1，也就是说比普通水重 10%。因此，在这种水的池里，甚至连不会游泳的人也不会沉下去。新发现的这种水叫做“重水”，它的化学式是 D_2O （在它的组成里的氢原子，比普通氢原子重一倍，它的符号是字母 D），普通水里含有很少量的重水：10 升饮水里大约含有重水 2 克。

我们现在已经能够得到几乎是纯净的重水 D_2O 了。在这种纯净的重水里，只含普通水 0.05%。

破冰船是怎样工作的？

在洗澡的时候，请你利用机会做一下下面的试验。在跳出浴盆以前，先打开它的放水孔，继续让自己的身体躺在盆底上。这时你的身体上露出水面的部分在逐渐加多，同时你也觉得你的身体在逐渐变重。在这种情况下，你可以极清楚地看出，只要你的身体一露出水面，它在水里失去的重量（你可以回想一下你在水里的时候曾经觉得自己是多么轻啊！）就立刻恢复。

鲸鱼不由自主地在作着同样的试验——在退潮的时候，如果搁在浅水滩上，也会有同样的感觉的。但是这对它会引起致命的后果：它会被自己的惊人的重量压死。难怪本来是哺乳动物的鲸鱼，却要住在水里：水的浮力能够救它，使它免得因重力的作用被压死。

以上所讲的跟本文的标题有很密切的关系。破冰船的工作是用相同的物理现象做基础的：露在水面上的那一部分船身，因为它的重量没有水的浮力作用把它抵消掉，所以仍旧有它原来的“陆上”重量。你不要以为破冰船在行驶的时候是用自己的船首部分的压力不断地切开冰的。破冰船不是这样工作的，这样工作的是切冰船，例如象在三十年代著名的“里特克”号。这种工作方法只能用来对付比较薄的冰。

真正的海洋破冰船是用另外一种方法工作的。破冰船上的强大的机器在开动的时候，能把自己的船首移到冰面上去，它的船首的水下部分就是因为这个缘故造得非常斜。船首出现在水面上的时候，就恢复了自己的全部重量，而这个极大的重量就能把冰压碎。为了加强作用力，有时候在船首的贮水舱里，还要盛满水——“液体压舱物”。

在冰块的厚度不超过半米的时候，破冰船就是这样工作的。遇到更厚的冰块，就要用船的撞击作用来制服它。这时候破冰船就向后退，然

后用自己的全部质量向冰块猛撞上去。这时候起作用的已经不是重量，而是运动着的轮船的动能；船好象变成了一个速度不大但是质量极大的炮弹，变成了一个撞锤。

几米高的冰山，破冰船就得用它坚固的船首猛烈撞击几次，才能把它们撞碎。

参加过 1932 年有名的“西伯利亚人”号通过极地的航行的水手马尔科夫曾经这样描写过这只破冰船的工作：

在几百座冰山中间，在密实地覆盖着冰的地方，“西伯利亚人”号开始了战斗。连续五十二小时，信号机上的指针老是在从“全速度后退”跳到“全速度前进”。在十三班每班四小时的海上工作里，“西伯利亚人”号疾驰着向冰块冲去，用船首撞它们，爬到冰上把它们压碎，然后又退了回来。厚达四分之三米的冰块慢慢地让出了一条路。每撞一次，船身就可以向前推进三分之一。

船沉下去沉到哪儿？

有一种流行的说法，甚至在海员当中也这样流传着，说是沉没在海洋里的船不会沉到海底，而是不动地浮悬在深海的某些地方，在那里，海水“已经因为上面各层水的压力的关系而变得密度相当大了”。

这种说法，看来甚至连《海底两万里》的著者儒勒·凡尔纳也表示同意。在这本小说的一章里，他描写了一只沉没了的船不动地浮悬在水里；在另一章里，他又提到一些“破船浮悬在水里”。

这一类见解是不是正确呢？

这类见解似乎有些根据，因为水的压力在深海里的确可以达到极大的程度。沉在 10 米深处的物体，每平方厘米所受到的水的压力只有 1 公斤。而在 20 米深处，这个压力已经是 2 公斤，在 100 米深处是 10 公斤，在 1000 米深处是 100 公斤。海洋里有许多地方，深度有达到好几公里的；大洋的最深部分（太平洋中马里亚纳群岛附近的深海），有达到 11 公里以上的。很容易计算出，在这些极深的海洋里，水和沉在水里的物体所受到的压力有多大。

如果把一个紧塞着瓶塞的空瓶投在相当深的水里，然后再把它拿上来，你就会发现瓶塞已经被水压进了瓶子，而瓶子也完全装满了水。海洋学家约翰·牟莱在所著的《海洋》那本书里说他做过这样的一个试验：拿三根不同粗细的玻璃管，管的两头都是烧熔封闭的，把它们卷在帆布里，然后放在一个上面有孔可以让水自由进出的铜制的圆筒里。把圆筒沉在 5 公里的深处。等到把它拿上来的时候，帆布里已经满是雪一样的东西：那是碎玻璃。如果把一块木头沉在同样深处，拿上来以后，它就会象砖头一样沉到水桶的底里，——水已经把它们压紧到这样的地步。

看来，我们自然会这样想，这样大的压力一定会把深海里的水压得非常密实，使重的物体到了那里也不能再往下沉，象铁秤锤在水银里不能下沉一样。

可是这一类见解其实是一点根据都没有的。实验告诉我们，水同一切普通液体一样，也是不容易压缩的。1 平方厘米的水受到 1 公斤压力的时候，它的体积只能缩小 $1/22,000$ ，以后每增加 1 公斤的压力，大致也

只能再缩小这么些。假如我们想把水压得这样密实，使铁到了里面也不会沉下去，那就得把水的密度增大到原来的 8 倍。可是要把水的密度增大一倍，也就是说把水的体积缩小一半，就得对每 1 平方厘米的水加上 11,000 公斤的压力（假定水在这样大的压力下压缩率也是这么大的话）。这样的压力只有在海面下 110 公里的地方才有！

从这里可以明白，要说深海里的水会显著地变得密实，那是完全不可能的。在海洋的最深处，水的密度也只是增大了 $1100 / 22,000$ ，也就是说，比正常的水的密度大 $1 / 20$ 或 5%。这对各种物体在那里的浮沉条件，几乎没有什么影响，何况浸在这里的固体物体也要受到这种压力，因而也会变得密实些。

所以沉没的船只会一直沉到海底，是一点疑问也没有的。约翰·牟莱说：“凡是在一杯水里能够沉的一切东西，到了最深的海洋里，也应当能一直沉到底。”

我曾经听到过有人对这一点提出的反对意见。如果你小心地把玻璃杯底朝天浸在水里，它就能悬浮在水里，因为它所排开的那一部分体积的水的重量，正同玻璃杯的重量相等。如果所用的是比较重的金属杯子，那它也会悬浮在水里，不过位置稍低一些，但不会沉到底下去。当巡洋舰或别种船只倾覆了往下沉的时候，大概也同样会停留在半路上。如果船上某些地方关住了空气而泄不出来，那末船也会沉到一定深度以后，停留在那里。

要知道有不少船是在底朝天的状态下沉到海里去的，所以里面一定有一些船没有沉到海底，而只是浮悬在幽暗的深海里。固然这种船的平衡状态只要轻轻一推动就会失去，失去平衡以后，它就会翻过身来装满水，一直沉到水底下去。可是我们知道，海洋的深处永远是十分平静的，连暴风雨的回声都侵透不进去，那末又往哪里去找这种推动力呢？

所有这些论证，在物理学上的根据都是错误的。底朝天的玻璃杯并不能自己沉到水里去。它同木块或塞紧了瓶塞的空瓶一样，必须在外力的作用下才能沉到水里去。同样，倒覆的船也不会往下沉，而要留在水面上。要叫它停留在从海面到海底的半路上，那无论如何是不可能的。

怎样实现儒勒·凡尔纳和威尔斯的幻想？

我们现在所有的真正的潜水艇，在许多方面不但赶上了儒勒·凡尔纳所幻想的“鸚鵡贝”号，并且还胜过了它。不错，现在潜水艇的航行速度还只有“鸚鵡贝”号的一半：现在的潜水艇每小时是 24 海里，而儒勒·凡尔纳所想象的是每小时 50 海里（1 海里大约等于 1.8 公里）。现代的潜水艇最长的航程是环行地球一周，而船长尼摩却完成了加倍的航程。但是在另一方面，“鸚鵡贝”号的排水量只有 1500 吨，船上的水手只有二三十人，同时又不能连续在水底停留 48 小时。而现在 1929 年造的属于法国舰队的“休尔库夫”号潜水艇却有 3200 吨以上的排水量，管

有人计算过，如果地球的引力突然消失，水变得没有了重量，那末海洋的水平面就会平均上升 35 米（因为被压缩的水恢复了正常的体积）。这时候 5,000,000 平方公里的陆地就会被海洋里的水淹没。原来这些陆地就只是因为周围海里的水被压缩了，才出现在水面上的。

理它的水手多到 150 人，在水下潜伏不动的时间可以长到 120 小时。

这艘潜水艇在完成从法国港口到马达加斯加岛的航行的时候，中途并没有在任何港口停靠过。“休尔库夫”上的人在居住方面，同“鸚鵡贝”上的人一样舒适。同尼摩船长的潜水艇比较，它还有一种显著的优点，就是在它的上层甲板上建筑有不透水的飞机库，用来停留侦察用的水上飞机。

另外还应当指出一点，儒勒·凡尔纳没有替它的“鸚鵡贝”号装置潜望镜，所以他的潜水艇不能从水里观察水面上的情况。

只有在一个方面，真正的潜水艇要长久地落在这位法国小说家的幻想后面：它入水不能那样深。

可是必须指出，在这一点上，儒勒·凡尔纳的幻想又超越了实际可行的范围。小说里的某一处说，“船长尼摩到达了海面下三千、四千、五千、七千、九千和一万米的深处。”而有一次“鸚鵡贝”号还下沉到一个空前的深处——沉到一万六千米深。小说的主人公说，“我觉得潜水艇铁壳上的拉条好象在发抖，它的支柱好象弯曲了，窗子好象在水的压力下在向里凹。如果我们的船不是象一个浇铸成的整体那样坚固，它立刻就会被压成饼了。”

小说里的主人公这样提心吊胆是完全有理由的，因为在水下 16 公里的深处（假如海洋里有这样深的地方的话）水的压力可以达到

$$16,000 \div 10 = 1600 \text{ 公斤 / 平方厘米}$$

或 1600 大气压，这样的压力是不能压碎铁的，可是毫无疑问会压坏船的结构。不过这样深的地方在现在的海洋地图上是不找到的。在儒勒·凡尔纳时代（小说是在 1869 年写成的）一般人都认为海洋有这么深，这完全是由于当时的测深工具有缺点。那时候，用来作测锤线的不是铁丝而是麻绳。麻绳做的测锤线入水越深，就越会被水的摩擦力截留住。到了十分深的地方，摩擦力就会大到即使我们尽量放松测锤线，它也不能再往下沉：只能使麻绳纠缠在一起，而这却造成一种不正确的印象，以为水非常深。

现代的潜水艇至多能经受住 25 个大气压，这就决定它们最多只能下沉到 250 米的深处。要下沉到更深的地方就得使用特别的装置，叫做潜水球（图 50）。这种装置是专门用来研究深海里的动物群的。它的形状并不象儒勒·凡尔纳的“鸚鵡贝”，而象另一位小说家威尔斯在故事《在海洋深处》里所幻想的深水球。这个故事的主人公坐在厚壁的钢球里，沉到了九公里深的海底。这个钢球在潜水的时候并不带绳索，而是带着可以拆卸掉的重物。在海底里，只要把潜水球所带的重物拆卸掉，它就变得轻了，很快就飞升到水面上。

在潜水球里，科学家已经到达了 900 米以下的深处。潜水球用钢索从船上放入深海，球中人可以跟船上人用电话保持联系。

不久以前，有些国家建造了几艘研究深水情况的特殊装置——不动式潜水球。它跟潜水球有一点最不相同。潜水球能在深海里运动，前进，而不动式潜水球只能悬在钢索下面。开始的时候，这种不动式潜水球先

现代装备了原子发动机的潜水艇，能够在不大了解的深海和深洋里自由选择航程。这种潜水艇航程非常远，不用在半路上浮出水面来加油。

是下沉到海面下 3 公里多的地方，后来到达过 4050 米的深处。1959 年十一月，这种装置又下沉到 5670 米，但这还不是它的极限。1960 年一月九日，到达了 7300 米，一月二十三日，又在马里亚纳深海里还沉到了 11,500 米的深处。根据最新的数据，这里已经是世界上最深的地方了。

“萨特阔”号是怎样打捞起来的？

在广阔的海洋里，每年总要沉没大大小小船只几千艘，特别是在战争的年代里。有一些很有价值而又容易打捞的沉船，已经被打捞起来。在这些打捞起来的船里面，有一艘很大的帝俄时代的破冰船“萨特阔”号，它是在 1916 年由于船长的疏忽而沉没在白海里的。在海底躺了十七年以后，这艘极好的破冰船才捞了起来修理好。

捞船的技术完全是用阿基米德原理做根据的。在沉没的船体下面的海底上，潜水手掘了十二条沟道，在每条沟道里穿过一条结实的钢带。带的两头固定在特地沉在破冰船两旁的浮筒上。全部工作都是在海面下 25 米的深处完成的。

浮筒（图 51）就是一种不会漏气的空铁筒，长 11 米，直径 5.5 米。它的铁筒重达 50 吨。按照几何定理，很容易求出它的体积大约是 250 立方米。非常明显，这样的空筒一定会浮在水面上：它本身的重量只有 50 吨，而它所排开的水却有 250 吨，就是说它的载重力等于 250 吨减去 50 吨，就是 200 吨。为了让浮筒沉在海底里，就得在里面装满水。

把 12 条钢带都固定在沉在海底的浮筒上以后，就开始用软管往浮筒里压入压缩空气。在 25 米的深处水的压力是 $\frac{25}{10} + 1$ ，也就是三个半大气压。现在却用四个左右大气压的空气往筒里压，所以能把筒里的水排出来。空筒变轻以后，四周的水就用很大力量把它们推向海面。它们在水里浮升上来，就象气球在空中浮升一样。在把所有浮筒里的水全部排除以后，它们总的浮力是 $200 \times 24 = 4800$ 吨，这已经超过了沉没了的“萨特阔”号的重量。所以为了更平稳地把船浮起来，空筒里的水只能排出一部分。

虽然是这样，“萨特阔”号还是经过几次失败以后才浮出海里的。“水下特殊工作队”的主任船舶工程师波布利茨基在叙述他的领导工作的时候说道：“打捞队在获得成功以前，曾经出了几次事故。有三次，在紧张地等着的时候，我们看到的并不是船，而是混在波涛和泡沫之间自己冲上水面来的一些浮筒和破碎的软管。有两次它已经捞上来了，没有等我们把它系住，又重新沉了下去。”

水力“永动机”

在许多“永动机”的设计当中，有不少是根据物体在水里能浮起的原理设计的。让我们从这一类的发明里选一种来谈一谈。这是一个高 20 米、里面装满水的高塔。在塔的上下两头各装一个滑轮，滑轮上绕一条坚固的绳索，就象一条循环带。在绳上装上十四只空的方箱，方箱的每边长 1 米。方箱是用铁皮制成的，水不能够透进去。图 52 和 53 画的就

是这种塔的外形和它的纵剖面。

这种装置是怎样工作的呢？每一个懂得阿基米德原理的人都能理解，水里的铁箱一定要往上面浮。推它们上升的力量就是它们所排开的水的重量，也就是一立方米水的重量乘上浸在水里的铁箱数。从图上可以看出，水里经常会有六只铁箱，这就是说把这些沉在水里的铁箱往上推的力量是 6 立方米水的重量，或六吨。铁箱本身的重量自然在把自己拉向下面，但是挂在塔外绳索上的六只铁箱也在向下沉，所以两方面的力量是平衡的。

这样，那条按照上面说的方式转动的绳索，经常在塔的内部维持着六吨向上的牵引力。显然，这个力量会迫使绳索不停地在滑轮上滑动，这时它们每转一周所做的功是 $6000 \times 20 = 120,000$ 公斤米。

如果全国布满了这样的塔，我们就可以从它们那里得到无穷的功，这足够供给我们全部国民经济使用。这样的塔会转动发电机，使我们得到无穷尽的电能。

可是我们如果仔细研究一下这个设计，就很容易看出，绳索完全没有动的可能。

为了使这根循环的绳索转动，必须让这些铁箱能够从下面进入水塔，从上面离开水塔。可是我们知道，铁箱在进入水塔的时候，必须克服 20 米高的水柱的压力！这个压在铁箱的每一平方米面积上的压力，不多不少，恰好是 20 吨（20 立方米水的重量），而向上的牵引力却总共只有 6 吨，要用它来把铁箱拉到水塔里去，显然是不够的。在那些不会成功的发明家们所设计的无数种水力“永动机”当中，也可以找到一些最简单而且最巧妙的。

请看图 54。把一只装在轴上的木制鼓形轮，一部分老是浸在水里。阿基米德的定律既然是靠得住的，那末，浸在水里的那部分鼓形轮就会在上浮；而且，只要水的推力比轴上的摩擦力大，那鼓形轮就会不停地转下去……。

可是，且别忙着制造这样的“永动机”！你一定会失败的：鼓形轮不会转动的。为什么呢？我们的推理错在哪儿呢？原来我们忽略了作用力的方向了。这里的作用力永远是和鼓形轮的表面垂直的，也就是跟通往轮轴的半径方向相同。可是经验告诉我们，顺着轮子的半径施力，轮子决不会转。要它转就得顺着轮周的切线方向来施力。这样一说，就不难明白，为什么这样的“永恒”运动也没有实现的可能了。

阿基米德的定律给了想发明“永动机”的人一种富于诱惑力的精神食粮，曾经鼓励他们千方百计去把看去的象是失去的重量用来做机械能的永恒泉源。但是他们的尝试，没有一个是成功的，也永远不可能得到成功。

好象是一个简单的问题

在一个容得下 30 杯水的茶炊里装满水。把一个茶杯放在它的龙头下面，眼睛看着拿在手里的表，看表上的秒针走多少时间，才能使茶杯装满水。假定是半分钟。现在要问：如果让龙头开着，要多少时间才能使茶炊里的水流完？

这好象是连小孩子都能解答的算术题目：流出一杯水需要半分钟，那末流出 30 杯水自然需要 15 分钟。

可是你试验一下看。试验的结果是：流完一茶炊水所需要的时间决不是一刻钟，象你所想的那样，而是半小时。

这到底是怎么一回事呢？要知道这算法原是很简单的啊！

简单是简单，可并不见得对。千万别以为水从茶炊里流出来的速度自始至终是一样的。第一杯水从茶炊里流出来以后，水流受到的压力已经因为茶炊里的水位降低而减小了。显然，要把第二个杯子装满，就得用比半分钟更多的时间；装满第三杯，时间还要长些……

装在没有盖的容器里的任何一种液体，从孔里流出来的速度跟孔上面那个液体柱的高度成正比。伽利略的学生托里拆利首先说明了这个关系，并且用简单的公式把它表明出来：

$$v = \sqrt{2gh}$$

式子里， v 代表液体流出的速度， g 代表重力加速度， h 代表孔到液面的高度。从这个公式可以看出，液体流动的速度跟液体的密度完全没有关系：轻的酒精和重的水银在液面同样高的情况下，从孔里流出来的速度是相同的（图 55）。从这个公式又可以看出，在重力只有地球上的 $1/6$ 的月球上，流满一杯水所需要的时间，一定相当于地球上所需要的时间的 $\sqrt{6}$ 2.5 倍。

现在让我们把话回到原来的问题上。如果茶炊里的水已经流出了 20 杯，里面的水面（从龙头的孔算起）降低到了原来的 $1/4$ 的时候，那末装满第 21 杯水所需要的时间，就要相当于装满第一杯水所需要的时间的 2 倍。如果后来水面继续降低到原来的 $1/9$ ，那末装满下一杯水所需要的时间就要相当于装满第一杯水所需要的时间的 3 倍了。大家知道，茶炊里的水快流完的时候，从里面流出来的水是流得多么缓慢啊！用高等数学可以解答这个问题：使一个容器完全流空所需要的时间，比同体积的液体在原来的水面不变的情况下完全流出所需要的时间增加一倍。

关于水槽的问题

从上面所讲的问题再进一步，就可以讲到那个大家都知道的、每一本算术习题集和代数习题集都要收集进去的水槽问题了。大家可能都记得这样一个古典的烦琐的问题：

“在一个水槽里装有两根自来水管。开第一根管子，可以在 5 小时里把水槽装满水；开第二根管子，可以在 10 小时里把满槽的水放完。如果同时开两根管子，问需要多少小时才能把这个空水槽装满水？”

这类问题已经有了悠久的历史，第一个提出它的人差不多可以追溯到二千年以前的希罗。下面就是他所提的问题之一，——这个问题比起他的后辈所提的确实要简单得多：

设有一个大水池，四个喷泉。

第一个喷泉一昼夜里把水池灌满。

第二个喷泉两天两夜才能把同样的工作做完。

第三个喷泉的能力只有第一个的三分之一。

最后一个要干四昼夜才能灌满它。
请回答我，如果四个喷泉同时放水，
要多少时间才能把水池灌满？

人们解答这类水槽问题已经有二千年了，可是他们的解答也错误了二千年，墨守成规的力量竟有这么大！为什么说是解答错了，你自己看了刚才谈过的茶炊流水问题以后，应该是会明白的。水槽问题一般是怎样解答的呢？例如第一个问题，是这样解答的：在一小时里，第一根管子能把水槽灌满五分之一，第二根管子把水漏去十分之一；就是说，在两根管子同时开放的时候，每小时实装进水槽里的水是 $\frac{1}{5} - \frac{1}{10} = \frac{1}{10}$ ，从这个式子就推算出装满水槽所需要的时间是 10 小时。但是这种推理是不正确的：即使水可以在不变的压力下均匀地流进水槽，但是它总是在水面越来越高的情况下不均匀地流出水槽的。所以我们决不能从第二根管子可以在 10 小时里流完水槽里的水这句话，就得出结论说，每小时可以流出十分之一水槽的水。用中小学的算术来解答这个问题，肯定是会算错的。初等数学既然不能解答水槽流水问题（涉及到流出水的），就不应该把这类算题收集在算术习题集里。

奇异的容器

能不能制造出这样一种容器，使流出的水不顾容器里面液体的面在逐渐降低，始终流出得很均匀而不会越来越慢呢？你读了前几节以后，也许会认为这是办不到的。

但是这是完全可以办到的。图 57 所画的瓶正是这样一种奇异的容器。这个容器是一个普通的窄颈瓶，通过它的塞子，插着一根玻璃管。如果你把比玻璃管下端更低的龙头 C 开放，液体就会均匀地往外流，一直到容器里的液面降低到跟玻璃管下端相平为止。如果把玻璃管插到差不多齐龙头的地方，你就可以使全部液体均匀地从容器里流出，虽然这是一股很弱的水流。

这是什么缘故呢？让我们想一想，在龙头 C 开着的时候（图 57）容器里会发生些什么情况。水向外流的时候，容器里的液面就会下降，外面的空气就通过玻璃管从水下面流进瓶里的稀薄空气里。气泡一个一个从水里冒上来，聚集在容器上部的水面上。这时候在 B 那么高低的水平面上所受的压力等于大气的压力。也就是说，从龙头 C 流出的水，只是在 BC 那一层水的压力下往外流，因为容器内外的大气压力是可以相互抵消掉的。也因为 BC 那一层水的高度是不变的，所以从龙头 C 流出的水始终保持着同样的速度，是一点也不奇怪的。

现在请你回答一个问题：如果拔去跟玻璃管下端相平的塞子 B，那末水会流出得多快呢？

原来水完全不往外流（当然这只是在孔非常小，可以不计算它的宽度的时候才是这样。不然的话，水会在同孔的宽度一样厚的那一薄层水的压力下向外流）。事实上，这里的内外压力都跟大气压力相等，没有什么力量能够迫使水向外流。

可是如果你把那个比玻璃管下端高的塞子 A 拔出来，那就不但没有水从容器里流出，外面的空气还会从这里流进容器里。为什么？原因很简单：在容器这一部分里，空气的压力比外面的大气压力要小。

有这种特别性质的容器是物理学家马里奥特想出来的，所以就叫做“马里奥特容器”。

空气的压力

在十七世纪中期，累根斯堡的居民曾经看到过一件奇事：十六匹马八匹拉向一面，八匹拉向另一面，用尽全力也没把彼此合在一起的两个铜制的半球拉开来。是什么力量使它们合得这样紧呢？“没有什么”，是空气。市长奥托·冯·格里凯就这样让大家亲眼看到了空气并不是“没有什么”，而是有重量并且能对地面上所有物体施很大的压力的。

这个试验是在 1654 年五月八日举行的。

关于著名的“马德堡半球”实验，物理学教科书里都有叙述。但是我还是相信，读者如果能从格里凯本人嘴里听到这个故事，一定会更有趣味。叙述他的实验的这一本书篇幅很大，是用拉丁文写的，1672 年在阿姆斯特丹出版。同那个时代所有的书一样，这本书的书名很长：

奥托·冯·格里凯
在无空气空间里
进行的所谓新的马德堡实验
实验最初是由维尔茨堡大学数学教授卡斯帕尔·萧特规划的。
著者自己出版，是内容最详细的版本，并附有各种新实验。

这本书的第 23 章专讲这个实验。让我们直译几段出来：

证明空气的压力能够把两个半球紧压得甚至连 16 匹马都不能拉开它们的试验。

我定做了两个铜制的半球，直径是四分之三马德堡肘，

可是实际上只有 $\frac{67}{100}$ 肘，因为工匠一般都不能精确地按照需要的尺码做出

活来。两个半球倒能够完全吻合。在一个半球上装了一个活栓；通过这个活栓可以抽掉球里的空气，并阻止外面的空气钻进球里去。此外，在两个半球上还安了四个环，环上穿着绳子，绳子缚在马的驾具上。我又叫人缝了一个皮圈；把皮圈放在蜡和松节油的混合物里浸透。把皮圈紧夹在两个半球的中间以后，空气就一点也不会漏进球里去了。活栓接上抽气筒的管子，把球里的空气抽出来。这时候可以看出，两个半球是用多大的力量通过皮圈紧紧粘附在一起。外面空气的压力把它们压得这样紧，连 16 匹马（拚命挣扎着）都不能把它们拉开，或者只有费了很大的劲才能拉开它们。当马用尽了全力把两个半球最后拉开的时候，还发出了很大的响声，象放炮一样。

可是只要把活栓转一下，使空气能够流进球里去，两个半球就很容

一个“马德堡肘”等于 550 毫米。

易被手拉开。

简单的算法能够告诉我们，为什么要用这样大的力量（每一边八匹马）才能把一个空球分开。空气的压力作用在每一平方厘米上大约是一公斤，直径 0.67 肘（37 厘米）的圆的面积等于 1060 平方厘米。这就是说，大气加在每一个半球上的压力在 1000 公斤（一吨）以上。每一边都应该用一吨的力量来拉，才能抵消掉球外空气的压力。

看起来这个重量对每一边八匹马说来好象并不很大。可是不要忘记，平常马在拉一吨重的货物的时候，所要克服的力量并不是一吨，而是比一吨小得多，只是车轮和轮轴之间、车轮和道路之间的摩擦力。这种摩擦力，譬如在公路上，不过是货物重的 5%，也就是一吨货物的摩擦力只有 50 公斤。（实践告诉我们，八匹马一起拉货的时候要损失拉力一半，这一点我们在这里不谈。）因此，八匹马的一吨拉力相当于拉 20 吨重的一辆货车。你看马德堡市长的马所要拉的这个空气的重压有多么重！它们好象是在拉着一台不在轨道上的小火车头。

曾经测量过，壮健的驮马拉货车的时候所用的力量，不过 80 公斤。所以为了拉开马德堡半球，在平稳的拉曳情况下，每一得用 $1000 \div 80 = 13$ 匹马。

读者如果知道我们骨骼的某些关节所以不会脱落，同马德堡半球不容易分开有同样的原因，那一定会觉得惊奇的。我们的髋部关节正是这样的马德堡半球。我们可以把连在这个关节上的肌肉和软骨都去掉，可是大腿还是不会掉下来：大气压力把它们压在一起了，因为关节之间的间隙是没有空气的。

新式的希罗喷泉

读者们大概都知道一种普通形式的喷泉，这种喷泉相传是古代的力学家希罗设计的。我在这里先谈一下它的构造，然后再谈这种有趣装置的新的形式。希罗喷泉（图 59）是由三个容器组成的，上面一个是没有盖的碟子（a），下面两个是密闭的球（b 和 c）。这三个容器用三根管子连了起来，连接的方法见图。在碟子 a 里装着一些水、球 b 里装满水、球 c 里装满空气的时候，喷泉就开始起作用了：水沿着管子从 a 流到 c，把 c 里的空气排到球 b 里；球 b 里的水受到进来的空气的压力，就沿着管子往上冒，在容器 a 上形成喷泉。到球 b 里的水流完了的时候，也就是说它里面的水全部流进了球 c 里的时候，喷泉就停止喷水了。

这就是希罗喷泉的老的形式。在今天，一位意大利学校教师已经改造了这种喷泉。这位教师由于自己的物理实验室设备太少，不得不运用自己的创造性来简化希罗的喷泉装置，结果他想出了一种用最简单的设

这里所以用圆的面积，而不用半球的表面面积，是因为大气的压力只有在跟表面垂直作用的时候，才会有上面所说的数值；对斜的表面说来这种压力就比较小。这里我们所用的是球的表面投在平面上的正射影，也就是大圆的面积。

这是速度在每小时四公里的时候所用的力量。平均说来，马的拉力等于它的体重的 15%；马的重量轻的大约是 400 公斤，重的有 750 公斤。在极短的时间里（刚用力的时候）拉力要大好几倍。

为什么每边得用十三匹马，读者可以参看我所著的《趣味力学》第一章，“两匹马的题目”一节。

备来制造新喷泉（图 60）的方法。在新装置里，药瓶代替了球形容器，橡皮管代替了玻璃管或金属管。上面那个容器也不一定要穿孔，只要象图 60 的上图所画的那样，把橡皮管的一端放在里面也成。

经过这样改造以后的仪器，使用起来就十分方便：当瓶 b 里的水经过碟 a 全部流进了瓶 c 的时候，只要简单地把 b、c 两个瓶子换一下位置，喷泉就会重新喷水；不过不要忘记，同时也要把喷嘴移到另一条管子上去。

改造以后的喷泉还有一种方便的地方，就是使我们有可能任意变动容器的位置，来研究各个容器的水面之间的高度差对水流喷射高度的影响。

如果你想把喷泉的喷射高度加大好几倍，只要把这个装置下面的两个瓶里的水换成水银，空气换成水，同时把喷嘴移一下（图 61）就可以做到。这个装置所起的作用是容易明白的：水银从瓶 c 流进瓶 b 的时候，就把瓶 b 里的水排出去，造成喷泉。水银的比重是水的 13.5 倍，我们知道了这点就可以算出，这时候的喷泉可以喷到多么高。让我们用 h_1 , h_2 , h_3 来表示各个液面之间的高度差。现在我们可以研究一下瓶 c 里的水银是用多大的力在向瓶 b 流去的。两瓶之间的连接管里的水银受到了两方面的压力。在右面对它起作用的是等于 h_2 的这么一段水银柱的压力（这个压力等于 $13.5h_2$ 这么高的水柱的压力）加上 h_1 这么高的水柱的压力。在左面起作用的是 h_3 这么高的水柱的压力。总起来看，水银所受的压力等于这么高的水柱的压力：

$$13.5h_2+h_1-h_3。$$

但是， $h_3-h_1=h_2$ ；所以我们可以用 $-h_2$ 来代替 h_1-h_3 ，上面那个式子就变成

$$13.5h_2-h_2，$$

也就是 $12.5h_2$ 。这样看来，水银压进瓶 b 里去的压力是一根高达 $12.5h_2$ 的水柱的重量。从理论上来说，喷泉喷射的高度应该等于两个瓶里的水银面的高度差的 12.5 倍。但是摩擦力会把这个理论上的高度稍微降低一些。

虽然是这样，这个装置仍旧使我们有可能得到很高的喷射水流。譬如说，为了使喷泉达到 10 米的高度，只要把一个瓶移到比另一个瓶大约高一米的位置就够了。奇怪的是，从我们的计算可以看出，碟 a 离水瓶的高低对水流的高度一点没有影响。

戏弄人的容器

在古时——十七和十八世纪——有些贵族用下面所讲的那种有科学意义的玩具来取乐：准备一只壶形杯——在这种杯的上部刻有一些象花纹一样的切口（图 62），在杯里装上酒。把酒给身分比较低的客人喝，尽情地同他们开玩笑。怎样喝这种壶形杯里的酒呢？不能把杯子斜过来：因为酒会从许多切口里流出来，一滴也不能喝到嘴里。这时候发生的情况，正象童话里所说的那样：

我也曾经在那里，
喝那蜂蜜酿的酒；
顺着胡子往下流，
可一滴也没到嘴。

可是知道这种构造的秘密——图 62 的右图指出了这个秘密——的人，只要用手指按住孔 B，再把嘴凑在壶嘴上吸，那不必把杯子斜过来，就可以把酒吸到嘴里。原来酒会经过孔 E 沿着壶柄里的一条沟和这条沟的延长部分 C（这一部分在壶口的边缘里面）来到壶嘴里。

水在底朝天的玻璃杯里有多重？

“当然一点重量都没有，因为水不能留在这样的杯子里，它会流掉，”你说。

“如果它不流掉，那该有多重呢？”我问。

事实上是可以使水留在底朝天的杯子里而不让它流掉的。图 63 所画的就是这种情况。一个倒过来的盛满水的玻璃高脚杯，它的底缚在天平的一个盘上，在这个杯里的水不会流掉，因为杯子的边缘是浸在一个有水的容器里的。在天平的另一个盘上放着一个相同的空的玻璃高脚杯。

那末哪一个天平盘比较重呢？

那个缚着底朝天的盛着水的高脚杯的天平盘比较重些。这个杯子上面受着整个大气压力，而下面的大气压力却要减掉杯里所盛的水的重量。为了使两个天平盘平衡，必须把放在另一个盘上的杯子也装满水。可见在上面说的条件下，那个倒过来的杯子里的水的重量跟正立着的杯子里的水的重量是相同的。

轮船为什么会互相吸引？

1912 年秋天，远洋航轮“奥林匹克”号——当时世界上最大的轮船之一——出了这样一件事。“奥林匹克”在大海上航行着，同时在离它一百米远地方，有一般比它小得多的铁甲巡洋舰“豪克”号几乎跟它平行地疾驰着。当两艘船到了象图 64 里所画的位置的时候，发生了一件意外的事情：小船好象是服从着一种不可见的力量，竟扭转船头朝着大船，并且不服从舵手操纵，几乎笔直地向大船冲来。结果就发生了撞船事故。“豪克”号的船头撞在“奥林匹克”号的船舷上；这次撞击非常剧烈，以致“豪克”号把“奥林匹克”号的船舷撞了一个大洞。

在海事法庭审理这件奇案的时候，大船“奥林匹克”号的船长被判做过失的一方，因为——法院的判决书说——他没有发出任何命令给横着开来的“豪克”号让路。

可见，法院在当时一点也没有看出任何异常的事情来：没有别的，只是船长调度失当。其实这里却发生了一个完全不能预料的情况：船在大海里发生了互相吸引的事故。

这样的事故以前在两艘船平行前进的时候大概也发生过许多次。可

是在还不能建造很大的船的时候，这种现象也显得并不严重。只是在最近这些年里，海洋里航行着许多“漂浮的城市”以后，船的吸引现象才十分显著起来。在海军操演的时候，舰队司令员也很重视这种现象。

在大轮船或军舰旁边驶过的小船所出的许多事故，大概都是同样的原因引起的。

那末怎样来解释这种吸引的现象呢？当然，这里是谈不上按照牛顿的万有引力定律而出现的引力的。这种我们在第四章里已经说过的引力在这里是太小了。这种现象完全有别的原因，得用液体在管子里和沟里的流动原理来解释它。可以证明，如果液体沿着一条有宽有窄的沟向前流动，那末在沟的狭窄部分它就会流得快些，并且压向沟壁的力量也比宽的部分小些；而在宽的部分它就要流得慢些，并且压向沟壁的力量也比较大些（这就是所谓柏努利原理）。

这个原理对于气体也是正确的。在关于气体的学说里，这种现象常常叫做“气体静力学的怪事”。据说，下面就是人们第一次偶然发现这种现象的经过。在法国一座矿山里，一个工人奉命把那个和外坑道相通的孔用护板遮蔽起来，这个外坑道是向矿井里输送压缩空气用的。这个工人和冲入矿井里的气流斗争了很久，却不能把它遮上；可是突然间，护板自己砰的一声关上了，关的力量竟是这样大，如果不是护板够大的话，它可能和大吃一惊的工人一起被拉进通风道里去。顺便说起，气流的这种特性也可以用来解释喷雾器的作用。当我们吹一个一头缩细的横管的时候（图 66），空气在细管里就会减小自己的压力。这样直管上面就出现了压力比较小的空气。结果大气压力就把杯子里的液体沿着直管压上来；液体到了管口，落在吹来的气流里，变成雾的形状散播在空中。

现在我们就不能明白两艘船之间所以会有引力的原因了。当两艘轮船平行地航行着的时候，在它们的船舷中间就好象有了一条沟。在普通的沟里，沟壁不动，水在动；这里却相反，是水不动，沟壁在动。不过从这里产生的力的作用却一点没有改变：在这条能动的沟的狭窄部分，水对沟壁所施的压力比它对轮船周围空间所施的压力要小。换句话说，两艘轮船的相对两侧从水里受到的压力比两船外侧部分受到的压力要小。这会产生什么样的后果呢？船在外侧的水的压力下一定会相向运动，而比较小的船只自然会移动得显著些，比较大的船几乎仍旧留在原处，一点也没有移动。这就是为什么大船很快地在小船旁边驶过的时候会出现特别强大的引力的缘故。

可见船只之间的引力是由流水的吸引作用造成的。急流对于洗澡的人的危险，漩涡的吸引作用，都可以用这个来解释。

可以算出，河里的水流在用每秒一米的普通速度前进的时候，就有 30 公斤力量在吸引着人的身体！受到这种力量吸引的人是不容易站住的，特别是在水里，当我们身体本身的重量不能使自己保持稳定的时候。最后，大家知道在飞速前进中的火车也有吸引作用：在用每小时 50 公里的速度前进的时候，它要用大约 8 公斤的力量吸引站在车旁的人。这也可以用柏努利原理来解释。

和柏努利原理有关系的现象虽然常常出现，但是一般人对于它的原理却知道得很少。所以把它详细地解释一下是有好处的。

下面我要从一本普及科学杂志所载的关于这个题目的通俗论文里摘

录几段，来供大家研究。

柏努利原理和它的效果

丹尼尔·柏努利在 1726 年首先提出的原理的内容是：在水流或气流里，如果速度小，压力就大，如果速度大，压力就小。这个原理也有一定的限制，但是在这里我们不谈它。图 68 说明了这个原理。向 AB 管吹进空气。如果管的切面小（象 a 处），空气的速度就大；而在切面大的地方（象 b 处），空气的速度就小。在速度大的地方压力小，速度小的地方压力大。因为 a 处的空气压力小，所以 C 管里的液体就上升；同时 b 处的比较大的空气压力使 D 管里的液体下降。

在图 69 里，T 管是固定在铜制的圆盘 DD 上的；空气从 T 管里出来以后，还要擦过另外一个跟 T 管不相连的圆盘 dd。两个圆盘之间的空气的流速很大，但是这个速度越接近盘边降低得越快，因为气流从两盘之间流出来，切面在迅速加大，再加上惯性在逐渐被克服。但是圆盘四周的空气压力是很大的，因为这里的气流速度小；而圆盘之间的空气压力却很小，因为这里的气流速度大。因此圆盘四周的空气使圆盘互相接近的作用比两圆盘之间的气流要想推开圆盘的作用大；结果是，从 T 管里吹出的气流越强，圆盘 dd 被吸向圆盘 DD 的力量也越大。

图 70 和图 69 相似，所不同的只是用了水。如果圆盘 DD 的边缘是向上弯曲的，那末在圆盘 DD 上迅速流动着的水会从原来比较低的水面自己上升到跟水槽里的静水面一般高。因此圆盘下面的静水就比圆盘上面的动水有更高的压力，结果就使圆盘上升。轴 P 的用途是不让圆盘向旁边移动。

图 71 画的是一个飘浮在气流里的很轻的小球。气流冲击着小球，不使它落下来。当小球一跳出气流，周围的空气就会把它推回到气流里，因为周围的空气速度小，压力大，而气流里的空气速度大，压力小。

图 72 里的两艘船，在静水里并排航行着，或者是并排地停在流动着的水里。两艘船之间的水面比较窄，所以这里的水的流速就比两船外侧的水的流速高，压力比两船外侧的小。结果这两艘船就会被围着船的压力比较高的水挤在一起。海员们都很知道两艘并排驶着的船会互相强烈地吸引。

如果两艘船并排前进，而当中一艘稍微落后，象图 73 所画的那样，那情况就会更加严重。使两艘船接近的两个力 F 和 F ，会使船身转向，并且船 B 转向船 A 的力量更大。在这种情况下，撞船是免不了的，因为舵已经来不及改变船的动向。

在图 72 里所说的一种现象，可以用下面的实验来说明。把两个很轻的橡皮球照图 74 那样吊着。如果你向两球中间吹气，它们就会彼此接近，并且互相撞碰。

鱼鳔是做什么用的？

同样的实验如果用线轴和圆纸片来做，就会更简易些。为了使圆纸片不滑向一旁，可以用大头针穿过线轴的槽，把纸片钉住。

关于鱼鳔的作用问题，一般的说法听起来好象是可以相信的。这种说法是，在鱼想从深水浮到水的上层来的时候，它就鼓起自己的鳔；这时候鱼的体积就增大，使被排开的水的重量大过自己的体重，——于是按照浮体原理，鱼就升到水面。如果它不想再上升，或者想下沉，那它就相反地压缩自己的鳔。这时候鱼的体积和它所排开的水的重量就会减小，鱼也象阿基米德原理所说的那样，沉到了水底。

关于鱼鳔功用的这种简单概念，是从十七世纪佛罗棱萨科学院的科学家们开始的；正式提出它的人是波雷里教授，时间在 1685 年。在以后二百多年里，对于这种说法没有人表示过异议，同时也在学校教科书里生了根。一直到经过新的研究家仔细研究以后，才发现这个理论是毫无根据的。

毫无疑问，鱼鳔对鱼的浮沉有极密切的联系，因为失去了鳔的鱼——它的鳔在实验的时候被取掉了——只有在鳍加紧摇动的情况下，才能浮在水里；鳍一停止，它就沉到水底去了。那末什么是鱼鳔的真正功用呢？十分有限：只是帮助鱼留在某一个一定的深处——就是留在鱼所排开的水的重量等于它本身的重量的那个水平上。当鱼用鳍使自己下沉到比这个水平更低的时候，它的身体由于经受着从水那一方面来的很大的外来压力，就要缩小，并且对鳔施加压力。这时候被鱼排开的水的体积减小了，被排开的水重量也变得比鱼的体重小了，于是鱼就不可避免地要往下沉。它下沉得越低，水的压力就越强（每下沉 10 米，水的压力要增加 1 个大气压），鱼的身体就被压缩得越小，也就更要继续往下沉。

在鱼离开原来已经取得平衡的那个水平，而用鳍的力量使自己升到更高的水平的时候，也会出现同样的情况，只是朝着相反的方向。鱼的身体摆脱了一部分外来的压力以后，鱼鳔要从里面把它撑大起来（鱼鳔里的气压在这以前是和周围的水压平衡的），体积增大了，也就向高处浮了起来。鱼升得越高，它的身体就胀得越大，也因而越要继续往上升。鱼是不能用“压缩鱼鳔”的方法来阻止这种趋势的，因为鱼鳔的壁上并没有能够主动改变自己体积的肌肉纤维。

我们所以说鱼真的是这样被动地扩大体积的，可以用下面的实验来证明（图 75）。把一条用氯仿麻醉过的鲤鱼放在一个盛着水的密闭的容器里，容器里维持着同天然水池一定深处的压力相接近的高压。这时候鱼会肚子朝天一动不动地卧在水面上。如果把它稍微浸得深一些，它就要重新浮到水面上来。如果把它放在离器底比较近的地方，它就会往器底里沉。但是在这两个水平之间的一层水里，鱼却可以保持平衡状态，不浮也不沉。所有这些现象，只要回想一下刚才讲过的鱼鳔的胀缩是被动的，就可以明白了。

所以，跟流行的说法相反，鱼是根本不会胀大和缩小自己的鳔的。鱼鳔体积的改变是被动的，是在外部压力增强或减弱的作用下进行的（按照波义耳-马里奥特定律）。这种体积的改变对鱼说来，不但没有好处，相反的替它招来了害处，因为它会使鱼不得不越来越快地沉到水底去，或是越来越快地升到水面上来。换句话说，鱼鳔能帮助鱼在不动的时候保持平衡，但是这个平衡是不稳定的。

捕鱼人观察到的情况，可以证明这种说法。在深海里捕鱼的时候，

常常可以看到有些鱼在半途中脱逃了，可是和人们的想法相反，它们并不重新沉入它们被捕的深水里，而是急速地上升到水面上来。这样的鱼，有时又可以看到它们的鳔已经突出到嘴外面来。

对鱼的浮沉来说，鱼鳔的真正功用就是这样。至于它在鱼的身体里是不是还起着别的作用，而这又是些什么样的作用，在目前都还不知道。所以这个器官在目前还是一个没有猜破的谜。在现在可以算是完全解释明白了的，只是它在流体静力学方面的作用。

波浪和旋风

有许多日常物理现象，都是不能用物理学上的简单的原理来解释的。甚至象有风的日子在海洋上常常看到的波浪现象，也不可能在中学校的物理教科书里详细解释明白。轮船在航行的时候，从船头散向平静的水里的波浪是怎样引起的呢？旗在刮风的时候为什么会飘得那样急呢？海岸上的细沙为什么会排列得象波浪一样呢？从工厂的烟囱里冒出来的烟为什么会成一团一团的呢？

要明白这些以及其他和这类似的现象，必须懂得液体和气体的所谓涡流运动的特点。在这里让我们略微多讲一些涡流现象，并且指出它们的主要特点来，因为在学校教科书里这种现象几乎是不讲的。

设想在管子里流着一种液体。假使液体里的所有微粒在管子里都是顺着一些平行线前进的，那末在我们面前就是一种最简单的液体运动形式——平静的流动或者象物理学家所说的“片流”运动。

可是这并不是最常见的现象。相反的，液体在管子里的不平静的流动却是最常见的现象，有许多涡流要从管壁流向管轴。这就是所谓涡流运动，也叫湍流运动。譬如自来水管里的水就是这样流动的（细的水管除外，细管里的水是片流的）。一种液体在一定粗细的管子里的流动速度达到一定大小的时候，也就是达到所谓临界速度的时候，总会有涡流发生的。

如果我们让一种透明的液体流过一根玻璃管，在液体里放一些非常轻的粉末，例如石松子粉，我们就可以用眼睛看到在管子里流着的液体的涡流了。这时候从管壁向管轴行进的涡流可以看得非常清楚。

涡流的这种特点，在制造冷藏器和冷却器的技术上都要利用。在管壁冷却着的管子里，有涡流的液体一定会使所有液体接触冷却壁比没有涡流的液体快。应当记住，液体本身是不大容易传热的，如果不去搅拌它们，它们冷却或增加温度都非常慢。血液和它所流过的各个组织之间所以能够那样快地交换热和物质，也就是因为血在血管里的流动不是片流而是涡流的缘故。

上面对管子所说的一切，同样能适用在露天的沟道和河床上：在沟和河里，水也是涡流前进的。在精确测量河流速度的时候，仪器会出现一种脉动现象，特别是在靠近河底的地方：脉动现象表明着水流在经常改变方向，也就是在起着涡流。河水不但沿着河床前进，象平时想象的那样，同时还要从河岸流向河中央。因此说在河的深处水的温度一年四

季都是相同的（总是+4℃），这种说法是不正确的：因为在靠近河底的地方流动着的水的温度，总是在被搅和着，跟河面上的一样（湖里的情况不是这样）。

在河底附近形成的涡流会带动轻沙，使河底出现沙“波”。同样的沙波也可以在波浪所能淹到的海边沙岸上看到（图 78）。如果靠近水底的水流是平静的，那末海底的沙面就会是平滑的了。这样说来，在被水冲过的物体的表面附近是会出现涡流的。关于这一点，可以拿顺着流水放的绳索会曲折成蛇形这一个例子来说明（把绳的一头系住，另一头让它自由漂在流水里）。为什么会这样呢？在绳的某一段附近出现涡流的时候，这一段绳就会被涡流带过去；可是过一会，另一个涡流又使这一段绳发生相反的运动。结果，绳就曲折成蛇形了。

现在我们要从液体转到气体，从水转到空气了。谁没有见到过旋风从地面上卷起尘土、稻草等东西呢？这就是说沿着地面出现了空气的涡流。当空气沿着水面运动的时候，在形成旋风的地方，由于空气压力已经降低，水也就会升高起来，引起波浪。在沙漠里和沙丘的斜坡上会产生沙波，也是由于同样的原因（图 80）。

现在就很容易明白，旗为什么会在风里飘扬（图 81）：旗在这里遇到的情况正同绳在流水里遇到的一样。风信旗的硬片在风里不能保持固定的方向，却要随着涡流总是摇摆不停。从工厂的烟囱里冒出的烟是一团一团的，也是同样的原因：炉子里的气体流过烟囱的时候也是作着涡流运动的。在烟离开烟囱以后，因为惯性关系，这种运动还要继续一些时候（图 82）。

空气的涡流运动对于飞行也有很大的意义。飞机的翼有特别的形状，机翼下面由制成机翼的材料把空气稀薄的部分填充了，而机翼上面的涡流作用却被加强了。结果机翼从下面得到了支托力，而从上面得到了吸引力（图 83）。鸟类展开翅膀飞翔的时候，也有类似的现象。

在风吹过屋顶的时候是起着怎样的作用的呢？空气的涡流在屋顶上面造成了一个空气稀薄的区域，屋顶下的空气为了要平衡这个压力，就向上压，把屋顶掀了起来。结果就使人们常常看到一种可悲的现象：有些轻的钉得不牢的屋顶被风刮了去。由于同样原因，大的窗玻璃在刮风的时候也会从里往外被压碎（不是从外往里被压碎）。不过这些现象也可以用流动着的空气里压力减小的道理来解释（参看第 128 页所讲的“柏努利原理”），比较简单些。

当温度和湿度都不同的两个气团彼此贴着流过的时候，每一个气团里都会发生涡流。云的各种各样的形状大半也是这个原因造成的。

我们看，同涡流有关的现象的范围竟有这么广。

在地心里旅行

地球的半径大约等于 6400 公里，可是还没有一个人到过地下 3.3 公里以下的深处。要到达地球的中心还有很长一段路。虽然这样，富于理想的儒勒·凡尔纳却让自己小说里的两个主人公——怪教授黎登布洛克和他的侄儿阿克赛——下降到地心里去。在《地心游记》那部小说里，他写了这两位地下旅行家的惊人冒险的事迹。他们在地下遇到的意外事

件当中，有一件就是空气的密度增大。空气是随着高度的增加而越来越快地稀薄的：在它的高度按照算术级数增加的时候，它的密度是按照几何级数减小的。反过来，在向海平面以下的地方下降的时候，空气在上层空气的压力下，就应当变得越来越密实。这一点，这两位地下旅行家当然是不会不注意到的。

下面是叔侄二人在地下 48 公里处的谈话。

“看一下，气压计指在什么地方了？”叔父问。

“压力高极了。”

“现在你看出，我们慢慢地下降，就会逐渐习惯浓密的空气，一点也不觉得难受的。”

“只是耳朵有些痛。”

“这算不了什么！”

“你说得对，”我不打算同叔父争论，就这样回答，“在浓密的空气里还觉得很愉快呢。你听，这里的声音是多么响亮啊！”

“当然喽，在这种空气里就是聋子也能听见。”

“但是空气要变得越来越密。到最后，它不会同水一样密吗？”

“当然会的，在 770 个大气压下就会是这样。”

“再往下降呢？”

“密度还会再增加。”

“那末这时候我们怎样下去呢？”

“可以在口袋里装些石头。”

“嘿！叔叔，您总是有办法的！”

我不再想猜测什么了，因为我怕再想出些什么阻碍旅行的话来，也许会使叔父生气。可是有一件事非常明显，就是在几千个大气压力下，空气可能会变成固体，到那时候就算人受得住这种压力，我们也只好停止前进。这却不是什么争论可以解决的。

幻想和数学

以上是这位小说家告诉我们的话。如果我们检验一下这段对话里的事实，却可以发现这只是些没有根据的幻想。我们不必到地心里去查究这件事情；我们只要预备一支铅笔和一张纸，在物理学领域里做一次小小的旅行。

首先让我们算一下，必须下降到多么深，气压才能增加千分之一。正常的气压等于 760 毫米水银柱的重量。假如我们不是住在空气里，而是住在水银里，那末我们只要下沉 $\frac{760}{1000} = 0.76$ 毫米，就可以使压力增高

千分之一。在空气里，我们当然要下降得更深一些，深度增加的倍数，应当是水银比空气重的倍数，也就是 10500 倍。所以要使压力比正常气压增加千分之一，我们下降的深度就不会象在水银里那样只下降 0.76 毫米，而是要下降 0.76 毫米 $\times 10,500$ ，也就是差不多 8 米。当我们再下

降 8 米的时候，压力又会增大自己的数值的千分之一，依此类推。总之，我们无论是在哪个高度上——在人类上升的最高限上也好（22 公里），珠穆朗玛峰的顶上也好（9 公里），在海平面上也好——都必须下降 8 米才能使气压比原来的数值增大千分之一。因此，我们就得到这样一个关于空气压力随着深度的增加而增长的表：

在地面上，压力 760 毫米=正常气压

在地面下 8 米深处的压力=正常气压的 1.001 倍

在地面下 2×8 米深处的压力=正常气压的 $(1.001)^2$ 倍

在地面下 3×8 米深处的压力=正常气压的 $(1.001)^3$ 倍

在地面下 4×8 米深处的压力=正常气压的 $(1.001)^4$ 倍

总而言之，在 $n \times 8$ 米深处，大气的压力就等于正常压力的 $(1.001)^n$ 倍，并且在压力不十分大的时候，空气的密度也要增加同样的倍数（马利奥特定律）。

根据小说里的话，地下旅行家所到的深度不过是 48 公里，所以重力的减小以及同这种减小有关的空气重量的减小，都可以不必计算。

现在就可以计算一下儒勒·凡尔纳的地下旅行家在 48 公里（48,000 米）深处所受到的压力。在我们的式子里

$$n = \frac{48,000}{8} = 6000$$

这里需要计算的是 $(1.001)^n$ 。把 1.001 自乘 6000 次是一个非常枯燥而且费时的工作。所以我们得利用对数。关于对数，拉普拉斯说得很正确，它能缩短我们的劳动，因而增加计算的人的寿命。用对数算的时候，我们有这样一个式子：要求的数的对数等于

$$6000 \times \log 1.001 = 6000 \times 0.00043 = 2.6。$$

从对数 2.6，我们得到了要求的数等于 400。

所以在 48 公里的深处，大气的压力是正常气压的 400 倍。实验告诉我们，在这种压力下空气的密度会增加到原来的 315 倍。所以我们的地下旅行家说，除了“耳朵痛”以外没有感到任何不舒服，那是很可怀疑的……在儒勒·凡尔纳的小说里，又曾经说到人们到过地下更深的地方——120 公里，甚至 325 公里。在那些地方空气的压力应该高到可怕的程度；可是人所能受得住的空气压力，是不能超过 3-4 个大气压的。

利用同一个式子，我们可以计算在多少深的地方，空气的密度会变得象水一样，也就是说密到原来的 770 倍。得到的数字是 53 公里。但是这个结果是不可靠的，因为在高压下，气体的密度已经不和压力成正比。

下一个 8 米的空气层，要比上一层更密实些，所以压力的增加数在绝对数值上要比上一层更大。因为这里所增加的千分之一，已经是比较大的数值的千分之一了。

在学校里对于对数表讨厌的人，如果读了拉普拉斯关于对数的说明，也许会改变自己对它的不友好的态度的。下面是《宇宙体系论》里的一段话：对数的发明“可以把几个月所做的计算减少到在几天完成，我们可以说这方法使天文学工作者的寿命延长一倍，而且使他们少犯错误，以及因长时间计算而造成的不可避免的烦闷。这种完全由学识而来的发明是人类精神上的宝贵成就；在工艺上人们依赖自然界里的质料和能量才能做出发明，而计算技术却只靠人们自己的创作。”

马里奥特定律只是在不太高的压力下（一百个大气压以内）才是完全正确的。下面是纳杰列尔实验得到的关于空气密度的资料。

压力	密度
200 大气压.....	190
400 大气压.....	315
600 大气压.....	387
1500 大气压.....	513
1800 大气压.....	540
2100 大气压.....	564

从这张表里可以看出，密度的增加是落在压力增加的后面的。所以儒勒·凡尔纳小说里的科学家想在达到某种深度以后，空气的密度会比水的还高，那是白费心思的。是不会有这种情况的，因为空气只有在 3000 个大气压下，才能同水一样密。在这以后，已经几乎不能再压缩了。要把空气变成固体，单用压力而不同时剧烈降低温度（零下 146 度），是不可能的。

可是为了公道起见，也需要指出，儒勒·凡尔纳的小说是在刚才举出的那些事实发现以前很久出版的。所以这位作者虽然说得不对，也是可以原谅的。

让我们再用上面那个式子来计算一下，不会危害在井底工作的人的健康，最深的应该是多深。我们的身体受得住的最大的空气压力是 3 个大气压。把需要求得的矿井的深度用 x 来代表，我们可以得到这个方程式：

$$(1.001)^{\frac{x}{8}} = 3$$

可以用对数算出 x 的数值。得出的结果是 8.9 公里。

所以在地面以下大约 9 公里的深处，人是能不受危害地居住的。

在深矿井里

撇开小说家的幻想来谈事实，谁曾到过离地心最近的地方呢？当然是矿工。我们在第四章里已经知道，世界上最深的矿井在南非洲，它的深度已经在 3 公里以上。在这里所讲的并不是钻探工具到达的深度（钻探工具在某些地方已经达到了 7.5 公里以上的深度），而是人迹所到的地方。下面是法国作家留克·裘尔登博士亲自参观了巴西的一个矿场以后关于这个矿场的描写（这个矿场的深度大约是 2,300 米）：

有名的摩洛·维尔荷金矿，坐落在离里约热内卢 400 公里的地方。在多山的区域里坐了 16 小时火车以后，你就可以下降到一个四周围着丛林的深谷里。在这以前从来没有人到过的深处，有一家英国公司在开采金矿。

矿脉是斜着往深里走的。矿井也随着矿脉建成了六级采掘段。竖直的有竖井，水平的有巷道。为了寻找黄金，人类才去做这个钻向地心的最勇敢的尝试——在地壳里挖掘最深的矿井，这的确是现代社会的一个最突出的特征。

你得穿上帆布的工作服和皮革的短上衣。在里面你得特别小心：落到井里的一块极小的石头都会把你打伤。我们由矿里的一位工长陪着一起下井，进入了第一个巷道，那里灯光很亮。巷道里的低到摄氏 4 度的冷风使你浑身发抖——这是为了降低矿井深处的温度而通进去的冷空气。

乘着狭窄的金属笼子走完了第一个深 700 米的竖井以后，就到了第二个巷道里。在第二个竖井里继续下降；空气变得比较暖和了。你已经在比海平面低的地方了。

从下一个竖井开始，空气就热得烫脸了。你挥着汗，在低的穹窿下曲着身体，朝着钻机的响声方向前进。有许多裸体的人在飞扬的尘土里工作。他们流着汗，手里不停地传递着水瓶。你不要触动那些刚打下来的矿石：它们的温度高达摄氏 57 度。

什么是这种可怕而且可恶的活动的结果呢——不过是每天大约 10 公斤的黄金……

在描写矿井底部的自然条件和工人们受到的极端剥削的程度的时候，这位法国作家只指出温度高，而没有提到空气压力的增大。

让我们计算一下，在 2300 米的深处空气的压力到底有多大。假如那里的温度和地面上一样，那末按照我们已经知道的公式，那里的空气密度就会增长到原来的

$$(1.001)^{\frac{2300}{8}} = 1.33 \text{ 倍。}$$

实际上那里的温度并不和地面一样，而是比地面高。因此空气的密度就不会增长到这么大，而是要小些。最后的结果是，就密度来说矿井底的空气和地面的空气之间的差异，只比炎热的夏天的空气和严寒的冬天的空气之间的差异大一些。现在就能明白，为什么矿里的气压不会引起参观的人注意。

可是显著的空气湿度在这种深井里却有很大的影响，在高温下，它会使得里面的人忍受不住。南非洲有一个深 2553 米的矿井（约翰内斯堡矿），在温度是摄氏 50 度的时候，湿度竟达到 100%。这里现在正在建造一种所谓“人造气候”的装置，这种装置所起的冷却作用，同 2000 吨冰相当。

乘平流层气球上升

在前几节里，我们曾经去地心作过想象的旅行，那时候那个表示气压和深度关系的公式帮了我们不少的忙。现在让我们冒险上升到上面去，利用同一个公式看看在极高的地方空气压力是怎样变动的。这个公式现在的形式是：

$$p = 0.999^{\frac{h}{8}},$$

在这个式子里， p 是大气压数， h 是高度（单位是米）。在这里我们用小数 0.999 代替 1.001，这是因为每上升 8 米，气压不是增高 0.001，而是降低 0.001。

首先让我们解答这个问题：得升到多高，气压才会减低到原来的一

半？要解答这个问题，我们用 $p=0.5$ 代入上面这个公式，然后求高度 h 。这样我们得到：

$$0.5 = 0.999^{\frac{h}{8}},$$

对于会用对数的读者说来，这个方程是不难解的。答案是： $h=5.6$ 公里，也就是说，要气压减低一半，必须上升到离地面 5.6 公里的地方。

现在让我们跟在航空家后面，上升到更高的地方，到 19 和 22 公里处去。大气里这么高的地方已经是在所谓平流层里。因此我们乘着来到这里的气球已经不是普通的气球，而是平流层气球。有两只气球曾经在 1933 年和 1934 年创造了上升高度的世界记录：前一个是 19 公里，后一个是 22 公里。

让我们算一下这么高的地方的气压吧。

我们计算出，在 19 公里高处的气压应当是

$$0.999 \frac{19,000}{8} = 0.095 \text{ 大气压} = 72 \text{ 毫米。}$$

在 22 公里高处应当是

$$0.999 \frac{22,000}{8} = 0.066 \text{ 大气压} = 50 \text{ 毫米。}$$

可是在平流层气球驾驶员的纪录里，我们却查出在上面说的高度，气压并不同我们算出的一样：在 19 公里处是 50 毫米，在 22 公里处是 45 毫米。

为什么得出的结果会同实际不符合呢？我们的错误在哪里呢？

马里奥特的气体定律，在压力这样小的情况下是完全可以适用的，然而这一次我们却忽略了另外一件事情：把整个 20 公里厚的空气层的温度看成是全都相同的。但是在实际上，它是随着高度而显著地降低的。平均说来，每上升一公里，温度要下降摄氏 6.5 度。这样到 11 公里的高处，温度已经是摄氏 -56 度了。可是再上去，温度在很大一段距离里却不再降低了。如果把这些情况都计算进去（这已经不能用初等数学来计算了），就可以得出更符合实际的结果。由于同样原因，我们以前求出的地下深处的气压，也应当看做是近似的答案。

第七章热的现象

扇子

人扇扇子的时候，自己当然会感到凉快的。他这样做，似乎对屋子里的其余的人是一点没有害处的，而且当时同他在一起的人好象还应当感谢他，因为他扇凉了屋子里的空气。

现在让我们看实际情况是不是这样。为什么我们用扇子扇的时候会感到凉快呢？原来直接贴在我们脸上的那一层空气变热以后，就成了一层看不见的罩在我们脸上的热空气面罩，它使脸部“发热”，因为它延缓了我们脸上的热进一步消散。如果围绕着我们的空气不流动，那末贴在我们脸上的这层热空气只能十分缓慢地被比较重的没有变热的空气挤向上面去。当我们用扇子扇走热空气层的时候，我们的脸部就老是跟一

份没有变热的新空气接触着，不断地把自己的热传给它们。我们身体上的热总是在消散，所以我们觉得凉快。

可见，人扇着扇子的时候，他是不断地在从自己的脸部赶走热空气，用没有变热的空气来代替它。等到不热的空气又变热了的时候，另外一份不热的空气又来代替它了……

扇子能加速空气的流动，使整个屋子里的空气温度很快地变得到处一样。可见扇着扇子的人是在用着别人周围的凉空气，使自己感到舒服。在下面我们还要谈一下扇子在另一种情况下所起的作用。

有风的时候为什么更冷？

大家都知道，人在没有风的天气里比在有风的天气里更耐冷。可是这种现象的原因并不见得每个人都知道得很清楚。在有风的时候觉得更冷，那只有生物才能感到。如果把温度计放在风里，它的水银柱是一点也不会下降的。人在有风的冷天所以会感到特别冷，首先是由于在那时候从脸部（一般说就是从全身）散掉的热要比在没有风的时候多得多；因为在没有风的时候，被身体暖和了的空气并不是很快地被新的一份冷空气所代替的。风力越强，在每一分钟里来得及流过来同皮肤接触的空气也越多。因此，每一分钟从我们身体上散掉的热量也越多。单是这一点，已经足够引起冷的感觉了。

但是还有另外一种原因。我们的皮肤经常在蒸发水分，就是在冷空气里也是这样。可是蒸发需要热量，就从我们身体上和从贴在我们身体上的那层空气里把热量夺取出去。如果空气不动，蒸发就进行得很慢，因为贴在皮肤上的空气层很快就饱和了水蒸气（在饱和了水蒸气的空气里，蒸发是不能进行的）。可是如果空气是动的，贴在皮肤上的空气经常在更换，那末蒸发就常常进行得很顺利，而这就会大量地消耗从我们身体里夺取的热。

那末风的冷却作用有多大呢？这是要看风的速度和空气的温度而定的；一般说来，它比普通所想的要大得多。现在让我举例来说明这一点。假定空气的温度是摄氏+4度，但是风一点也没有。在这样的条件下，我们皮肤的温度是摄氏31度。如果现在吹来了一阵刚能吹动旗子但还不能吹动树叶的微风（速度是每秒2米），那末我们皮肤上的温度就要下降7度。在能使旗子飘扬的风（速度是每秒6米）里，皮肤的温度要下降22度，结果就只剩9度了。

总之，要判断我们所感到的冷，单凭温度是不够的，对于风的速度同样也应当注意。列宁格勒和莫斯科的寒冷程度是相同的，但是一般说莫斯科人会比列宁格勒人觉得冷得好受些，因为在波罗的海沿岸平均风速是每秒5-6米，而在莫斯科每秒只有4.5米。在外贝加尔区平均风速只有每秒1.3米，所以那里的寒冷会更好受些。东部西伯利亚的寒冷是出名的，但是它并不象住在欧洲吹惯了比较大的风的人所想象的那样难受。原来东部西伯利亚差不多是完全没有风的，特别是在冬季。

沙漠的热风

“这样说来，风在炎热的日子里也应当带来凉快了，”读者读了上面一段文章以后也许会说。“那末为什么在这种情况下旅行家有时候又提到所谓沙漠的热风呢？”

所以会有这个矛盾，是因为在热带气候里，空气常常比人体更热。在那里，人在起风的时候会觉得更热，而不是觉得更凉快，是一点也不奇怪的。那里已经不是人体把热传给空气，而是相反地空气把热传给人。因此每分钟里流过来同人体接触的空气越多，人就越感到热。不错，这里的蒸发作用还是会因起风而加强的，但是热风带给人体的热究竟更多些。这也就是为什么沙漠里的居民，例如土尔克明人，要穿长袍和戴皮帽。

面纱能不能保温？

这是日常生活里的又一个物理学问题。妇女们都肯定说，面纱可以保温，不带它脸就觉得冷。可是在看到面纱是那样薄，上面还有相当大的孔的时候，男人们往往是不相信这话的，总以为面纱的保温作用只是妇女们的心理作用。

可是，如果你回想一下上面所说的话，那你对于这个说法就不会认为太没有根据了。面纱上的孔尽管很大，空气要透过面纱总要慢一些。直接贴在脸上的那一层空气变热了以后，本来就有面罩的作用；而现在这一层空气在面纱阻拦下，不会象没有面纱的时候那样很快地被风吹散。因此没有理由不相信妇女们说的话：在略微有点冷和起着微风的时候散步，不带面纱要比带着面纱脸上觉得凉些。

冷水瓶

你如果没有看到过这种瓶，你也许听人说起过或者在书报里读到过。这种用没有烧过的粘土做的容器有一种有趣的性能，它能使灌在里面的水比周围的物体变得更凉些。这种容器南方各民族用得很多。它有各种各样的名字，在西班牙叫“阿里卡拉查”，在埃及叫“戈乌拉”，等等。

这种水瓶的冷却作用的原因很简单：瓶里的水透过粘土壁来到瓶外，会慢慢地蒸发，蒸发的时候就从容器和它里面的水里夺取一部分热。

不过这种容器里的水也不会变得很凉，象某些南国游记里所描写的那样。这里的冷却作用是不会很大的。它同许多条件有关系。空气越热，渗到容器外的液体就蒸发得越快越多，容器里面的水因而也就越凉。它也同周围空气的湿度有关：如果空气里水分很多，蒸发就进行得慢，容器里的水也就不十分容易冷却；反过来，在干燥的空气里，蒸发进行得很快，容器的冷却作用也就更显著些。风同样能够加速蒸发，帮助冷却。你如果在热而有风的日子穿一件湿衣服，你就会觉得很凉快，从这一点就可以明白风的作用了。冷水瓶里温度的下降不会超过 5 度。在南方炎热的日子里，温度计有时候指着摄氏 33 度，这时候冷水瓶里的水往往同温水浴池里的水的温度相同：摄氏 28 度。这样看来，这种容器的冷却作用实际上并没有多大用处。但是它能很好地保持冷水的温度，使它不

热，它的主要用途也就在这一方面。

我们可以计算一下冷水瓶里的水可以冷到什么程度。

假设我们的冷水瓶可以盛水 5 升；并且假定瓶里的水有 1 / 10 升已经蒸发掉了。在摄氏 33 度的热天，蒸发 1 升（1 公斤）水大约需要 580 大卡的热。既然瓶里的水已经蒸发掉了 1 / 10 公斤，可知它已经消耗了 58 大卡的热。假如这 58 大卡的热全是瓶里的水供给的，瓶水的温度就会降低 58 / 5，也就是大约 12 度。可是蒸发用的热大部分是从瓶壁上和瓶壁四周的空气里取得的；另一方面，瓶里的水一边在冷却，一边又在从贴在瓶外的热空气里取得热量而变热。因此，瓶里的水只能冷到上面求得数字的一半。

很难说，冷水瓶在什么地方冷却得更多些——是在日光下，还是在阴影里。在日光下，蒸发是加快了，可是同时进入瓶里的热也加多了。最好的方法大概是把冷水瓶放在略微有些风的阴影里。

不用冰的“冰箱”

根据蒸发致冷的原理，可以制造一种不用冰的冰箱，来保藏食物。这种冰箱的构造很简单。它是用木头做的（最好用白铁皮来做），箱里装有架子，架上可以安放要冷藏的食品。在箱顶上放一个长形的容器，容器里盛清洁的冷水；再拿一块粗布，把它的一端浸在容器里，让布的其余部分顺着“冰箱”的后壁往下挂，使另一端落在“冰箱”下面的另一个容器里。粗布湿透了水以后，水就会象通过灯芯一样，不断地在粗布上通过。这时候水会慢慢蒸发，使“冰箱”的所有部分变冷。

这种“冰箱”应该放在室中凉爽的地方，并且要每天晚上更换冷水，使它在夜里来得及完全变凉。当然，盛水的容器和吸水的粗布应当十分清洁，那是不待说的。

我们受得住多高的热？

人类耐热的能力，比普通所想象的要强得多。南方各国人民能忍受住的温度，比我们住在温带的人认为无法再忍受的温度要高得多。澳洲中部夏天的温度在阴影的地方常常高到摄氏 46 度，最高甚至到过摄氏 55 度。轮船从红海驶入波斯湾的时候，船舱里虽然不断地通着风，里面的温度仍然高到摄氏 50 度以上。

地面上，在自然界里见到的最高温度，没有超过摄氏 57 度的。北美洲加利福尼亚一个名叫“死谷”的地方，曾经测定有过这样高的温度。

刚才所说的温度都是在阴影里测量出来的。让我顺便解释一下，气象学家为什么喜欢在阴影里而不喜欢在阳光里测量温度。原来只有放在阴影里的温度计测出来的才是空气的温度。如果把温度计放在阳光下，太阳就会把它晒得比周围空气热得多，因而温度计上所指的度数就不再是周围空气的温度了。所以如果用放在阳光里的温度计来测温度，那是一点意义也没有的。

已经有人用实验方法测出了人体能够忍受的最高温度。原来在干燥的空气里，把人体周围的温度极慢极慢地增高，人不但能忍受住沸水的

温度（摄氏 100 度），有时候还能忍受住更高的温度（一直高到摄氏 160 度）。英国物理学家布拉格顿和钦特里为了实验，曾经在面包房的烧热的炉子里停留过几小时，就是证据。丁达尔也曾经指出过：“人如果停留在空气的温度热到可以烧熟鸡蛋和牛排的房间里，还是可以安全无害的。”

那末，人怎样会有这样高的耐热能力呢，原来人体实际上是不接受这样的温度的，它还保持着接近正常体温的温度。它用大量出汗的方法来抵抗高温；汗水蒸发的时候，能从紧贴皮肤那一层空气里吸取多量的热，使这层空气的温度大大减低。不过要人体能够忍受高温，唯一需要的条件是：人体不能直接接触热源，而且空气必须干燥。

许多人有过这样的经验，盛夏温度达到三十度以上，比之黄霉天温度只有摄氏二十多度反而更容易忍受。原因当然在于黄霉天湿度高，而盛夏的湿度比较低。

是温度计还是气压计？

有一个出名的故事，谈到一个人因为下面所说的一种不平常的原因而不愿洗澡。

“我把气压计插在浴盆里，可是气压计告诉我有雷雨……，这时候洗澡是危险的！”

可是你别以为温度计和气压计常常是很容易分清的。有一些这样的温度计，说得正确一些是验温器，很可以叫它做气压计；相反的，也有一些气压计可以叫做温度计。希腊人希罗想出的那种验温器（图 84）就可以当做例子。在阳光里把球晒热以后，球上部的空气就会膨胀，膨胀的空气就顺着曲管把水压到球外去。水开始从管的一端滴在漏斗里，再从漏斗流到下面的箱子里。在冷天，相反地，球里的空气压力会减小，于是下面箱子里的水就在外面空气的压力下沿着直管升到球里。

可是这个仪器对气压的变动也是很敏感的：当外面的气压降低的时候，球里还保持着原先那种比较高的压力的空气就会膨胀，并且把一部分水顺着管子压进漏斗里。在外面的气压升高的时候，箱子里的一部分水也会被外面比较高的气压压到球里来。温度计每升降一度使球里的空

气体积发生的变化，同气压计上水银柱升降 $\frac{760}{273}$ 也就是大约 2.5 毫

米的时候球里空气体积所发生的变化一样。在莫斯科，气压的变动可以达到 20 毫米以上，20 毫米相当于希罗验温器上的摄氏 8 度，也就是说，气压降低 20 毫米很容易误认做温度升高了摄氏 8 度！

这样你就可以看出，古老的验温器简直可以说是一种气压计。有一个时候市上曾经可以买到一种盛水的气压计，它差不多也是一种温度计。可是关于这一点，不但购买的人不可能想到，也许连发明它的人也不会想到。

煤油灯上的玻璃罩是做什么用的？

很少有人知道，煤油灯上的玻璃罩在变成目前的形状以前，曾经历

了多少长的道路。

灯罩究竟有什么用呢？

对于这样一个极其平常的问题，也未必是每一个人都能正确地回答的。保护火焰使它不致被风吹灭，只是灯罩的次要功用。它的主要功用是增加火焰的亮度，加快燃烧的过程。灯罩的功用同炉子或工厂里的烟囱的功用一样，它能使外面的空气大量地流向火焰，增强通风。

让我们把这一点仔细研究一下。火焰烧热灯罩里面的那个空气柱，比它烧热灯的四周的空气要快得多。空气热了以后就变轻，就被经过灯孔从下面来的、还没有热的比较重的空气推向上面。这样一来，空气就不断地从下向上流动；这种流动会不断地带走燃烧生成的产物，并且带来新鲜空气。灯罩越高，热空气柱和冷空气柱在重量上的差数就越大，于是新鲜空气也就更有力地流入灯罩，使燃烧进行得更快。这里所发生的一切同工厂的高烟囱里所发生的完全是一回事。所以这些烟囱也要做得很高。

有趣的是，达·芬奇（1452 - 1519）对于这种现象作过研究，他的笔记里有这样一句话：“有火的地方，在它的周围就会形成气流；这种气流能够帮助燃烧，加强燃烧。”

为什么火焰自己不会熄灭？

如果你好好地想一想燃烧过程，你自然而然会产生一个问题：为什么火焰自己不会熄灭？我们知道，燃烧生成的产物二氧化碳和水蒸气都是不能燃烧的物质。所以火焰从一开始燃烧起，就会被不能助燃的物质包围住，这阻碍了它同空气接近。没有空气，燃烧就不能持久，也就是火焰会熄灭。

那末为什么这种事情不发生呢？为什么在燃料没有烧完的时候，燃烧过程会不间断地持续下去呢？

唯一的原因就是气体热了以后会膨胀，因而会变得更轻。只是因为这一点，热的燃烧生成的产物就不能留在它形成的地方，或直接靠近火焰的地方，而要很快地被新鲜的空气排到上面去。假如阿基米德原理在气体上不适用（或者说，假如没有重力），那末无论什么样的火焰都不能燃烧很久，而会自己熄灭的。

火焰燃烧生成的产物，对于火焰的有害的影响是极容易看出来的。你自己就常常在不知不觉中利用它来熄灭灯里的火焰。想一想你是用什么方法来吹灭煤油灯的吧。你是在灯罩上面吹它的，那就是说，你在把燃烧生成的不能助燃的产物赶向下面，赶到火焰上去。这样，火焰就因为得不到充足的空气熄灭了。

儒勒·凡尔纳小说里漏写的一段

儒勒·凡尔纳曾经详细地告诉了我们那三位勇敢的人在奔赴月球的炮弹车厢里是怎样度过时间的。可是他没有谈到米协尔·阿尔唐在这种非常的环境里是怎样完成他的炊事员的任务的。也许这位小说家认为在飞行炮弹里做烹调工作，没有什么东西值得描写。如果真是这样，那他

就错了。原因是在飞行炮弹里面一切物体都变得没有重量了。儒勒·凡尔纳忽略了这一点。如果你同意在没有重量的厨房里做烹调工作这一情节是一个完全值得小说家来描写的题目，那你一定会惋惜这位《炮弹奔月记》的天才作家竟没有注意到这个题目。现在就让我试着把那篇小说里漏写的一段补充进去，并尽可能使读者读了以后能得到象儒勒·凡尔纳本人写的一样的效果。

在读这一段文章的时候，读者们应该随时记住，在炮弹里面——前面已经说过——是没有重力的；里面所有的物件都是没有重量的。

在没有重量的厨房里做早餐

“朋友们，大家都还没有吃早点呢，”米协尔·阿尔唐向星际旅途中的同伴们说，“虽然在炮弹车厢里失掉了重量，但是总不见得连食欲都失掉了吧。朋友们，我准备给你们做一顿没有重量的早餐。这份早餐里的菜一定是世界上所有做出来过的菜当中最轻的几道。”

不等同伴们回答，这个法国人就动手工作起来。

“我们的水瓶怎么竟好象是空了，”阿尔唐一面摆弄那个拔去了塞子的大水瓶，一面自言自语地抱怨着，“你骗不了我的：我知道你为什么这样轻……塞子已经拔掉了，快把你里面的没有重量的东西流到锅里去吧！”

可是无论他怎样把瓶子放倒，水总是不流出来。

“别费事了，亲爱的阿尔唐，”尼柯尔出来帮助他说，“你应当懂得，在我们这个没有重力的炮弹车厢里，水是流不出来的。你得把它从瓶里抖出来，象抖浓的糖酱一样。”

阿尔唐略微想了一下，就用手掌在那个瓶口朝下的玻璃瓶底上拍了一下。却又奇怪，瓶口上立刻胀出了一个象拳头一样大的水球。

“我们的水变成什么啦？”阿尔唐惊奇地说，“这简直是太出乎意料了！有学问的朋友们，请给我解释一下，这到底是怎么一回事？”

“亲爱的阿尔唐，这就是水滴，简单的水滴。在没有重力的世界里，多大的水滴都会有的……你要记住，流体只有在重力的影响下，才会同容器的形状一样，才会成股地往外流。因为这里没有重力，所以流体就只受它自己里面的分子力支配，形成球的形状，象普拉图的有名实验里的油一样。”

“我不懂什么普拉图和他的实验！我的职务是烧开水做汤。我敢发誓，什么分子力也不能阻止我！”这位法国人急躁地说。

他开始用力把水倒在那在空中飞着的锅上面——可是好象所有的一切都商量好在反对他。一些很大的水球来到锅上以后，就很快沿着锅面滚了开来。事情并没有完：水又从锅的里壁越到外壁，顺着锅壁散开——于是很快这口锅就好象罩上了厚厚的一层水。在这种情况下要把水烧开自然是不可能的。

“这是一个非常有趣的实验，它证明了内聚力是多么强大。”沉着

这一种有趣情况，我已经在《趣味物理学》前编里详细解释过了，此外在我写的《行星际的旅行》等书里也都讲到过。

的尼柯尔镇静地对怒气冲冲的阿尔唐说：“你不要激动，要知道这只是液体润湿固体的普通现象，不过在这里没有重力来阻止这种现象全力发展罢了。”

“没有重力来阻止它，那真是该死！”阿尔唐反驳说，“不管它是不是液体润湿固体的现象，我的水总得在锅里煮，而不能在锅外煮。这真是新鲜事儿！在这样的条件下，无论哪一个厨师都无法做出汤来的！”

“如果这种润湿现象妨碍你，你也可以用一个简单方法防止它，”巴尔比根站起来安慰他说，“在物体上面涂了即使薄薄的一层油，水就不能润湿它，这一点你还记得吧。你只要在锅的外面涂上一层油，就可以把水留在锅里了。”

“好极了！这才是真正的学问，”阿尔唐一面照着做，一面高兴地说。然后他就开始在煤气炉上烧水。

不料阿尔唐又遭到了反对。煤气炉也跟他开起玩笑来了：暗淡的火焰燃烧了半分钟以后，不知什么道理就熄灭了。

阿尔唐在煤气炉旁边忙碌着，耐心地照看着火焰，可是白忙了一阵，火焰还是燃不久。

“巴尔比根！尼柯尔！难道就没有办法叫这固执的火焰按照你们的物理学原理和煤气公司的章程燃烧起来吗？”这位垂头丧气的法国人向朋友们求救了。

“可是这里也没有什么异常的意外事情，”尼柯尔解释道，“这火焰正是按照物理学的原理燃烧的。至于煤气公司……，我想，假如没有重力的话，它们早已破产了。你知道在燃烧的时候，会产生一些不能燃烧的气体：二氧化碳和水蒸气。通常这些燃烧生成的产物是不会逗留在紧靠火焰的地方的：因为它们是热的，因而也是比较轻的，所以会被四面流来的新鲜空气排到上面去。可是这里没有重力，因此燃烧生成的产物就逗留在它们产生的地方，在火焰周围形成一层不能燃烧的气体，阻止新鲜空气同火焰接近。就是这个缘故，火焰在这里会燃烧得这样暗淡，会熄得那样快。要知道灭火器的作用也是这样，用不能燃烧的气体来包围火焰。”

“照你这样说，”阿尔唐插嘴说，“如果地球上没有了重力，那就不必要救火队了。失了火会自己熄灭，是不是？”

“说得对，的确是这样。不过现在我们来帮助你，请你把火再点起来，然后向火焰里吹气。我相信，我们是能够用人工吹风法来使火焰象在地球上一样燃烧的。”

于是就照这样做了。阿尔唐点着了火以后就动手做饭，同时好象有些幸灾乐祸地看着尼柯尔和巴尔比根两人轮流地吹火和扇火，让新鲜空气不断地流到火焰里去。在这位法国人的内心里，认为“这许多麻烦”全是他的朋友和他们的科学招来的。

“你们这样吹风有些象在做工厂里的烟囱的工作，”阿尔唐带点讥诮的口吻说，“我非常可怜你们，我的科学家朋友，可是如果我们想吃一顿热的早餐，那就一定得服从你们的物理学的命令。”

可是时间一刻钟、半小时、一小时过去了，锅里的水竟没有开的意思。

“你得有些耐心，亲爱的阿尔唐。普通有重量的水开得很快，你懂

得是什么缘故吗？那只是因为锅里的水在发生对流作用：底下的一层水热了就变轻，被冷水排向上面，结果全部的水就很快得到了高温。你有没有做过从上面而不是从下面来烧水的事吗？这时候各层水就不会起对流作用，因为上层烧热了的水只能留在原处。水的传热作用是很小的；上层的水甚至已经达到沸点，下层水里可能还有没有融化的冰块。可是在我们这个没有重量的世界里，无论在哪一面烧水都一样：锅里不会发生水的对流，所以水应该热得非常慢。如果希望水热得快，你就应该不时搅拌水。”

尼柯尔又告诉阿尔唐，不要把水烧到 100 度，而要烧到稍微低一些的温度。在 100 度的时候会产生许多水蒸气，而水蒸气在这里同水的比重相同（都等于零），会混合一起，形成均匀的泡沫。

接着豌豆又意外地捣起蛋来。当阿尔唐解开麻袋轻轻地用手扒了一下的时候，豌豆就向四周散开，开始在车厢里无休止地飘来飘去，碰到墙壁又弹了回来。这些飘着的豌豆差一点闯了一个大祸：尼柯尔在无意中吸进了一颗豆子，使他不断地咳嗽，几乎噎死。为了避免发生这种危险和澄清空气，我们的朋友们都热心地用网捕捉飞豆，这网是阿尔唐预先带在身边，准备到月球上去“采集月球上的蝴蝶标本”的。

在这样的条件下，做饭真不容易。阿尔唐肯定说，就是最有本领的厨师到这里来，也是不会有办法的，这句话真不假。在煎牛排的时候，也忙乱了一大阵：得始终用叉子把牛肉叉住，不然的话，在牛排下面出现的油蒸气的压力会把牛排推出锅去，使没有熟的肉往“上面”——姑且使用这两个字，因为在这里是没有“上面”和“下面”的——飞。

在这个没有重力的世界里，就是连吃饭这件事本身也变成一种奇怪的景象。朋友们用各种不同的姿势悬在空中，怪好看的，可是时时刻刻发生着彼此撞头的事情。坐下来当然是不可能的。象椅子、沙发、板凳之类的东西，在没有重力的世界里是完全没有用处的。其实桌子在这里也完全可以不用，要是阿尔唐不坚持一定要在“桌旁”吃饭的话。

要烧熟肉汤已经不很容易，可是要喝肉汤比这还要困难。一开始要把没有重量的肉汤分别倒在几个盘子里，就怎样也不能成功。阿尔唐为了这件事几乎空忙了一个早晨，他忘记了肉汤是没有重量的，怀着烦恼的心情把锅底朝天翻过来，以便把固执的肉汤赶出锅外。结果，锅里却飞出了一个很大的球形水滴——丸子样的肉汤。这真需要阿尔唐显出魔术家的手段，才能十分困难地把这熟肉汤丸子再捉回来，放进锅里。

试用羹匙来舀汤，也没有得到结果：肉汤把整个羹匙一直到手指全都打湿了，并且密实地盖在上面。于是把油涂在羹匙上，以便防止这种润湿现象。可是情况并没有好转：肉汤在羹匙里变成了小球，并且无论怎样也不能把这没有重量的丸子顺利地送进嘴里。

最后还是尼柯尔想出一个办法，解决了这个问题：他用蜡纸做了些纸管，大家用蜡纸管吸肉汤，才算把它喝上了。我们的朋友们后来在旅途中，总是使用这种方法来喝水、喝酒和喝不论什么样的液体的。

在这本书出版以前许多读者曾经写信问我，他们对于在没有重力的环境里能够喝水这一点，表示怀疑。他们甚至认为就是我用刚才所说的方法也不能喝到水。他们认为在飞行炮弹里空气是没有重量的，因而也不会产生压力。在没有压力的情况下，要用吸的方法来喝水是不可能的。奇怪的是，这种意见还被一些评

为什么水会浇灭火？

这个问题虽然很简单，但是常常有人把它答错，所以我们要在这里简短地讲一下，水对火究竟起了些什么作用，希望读者不要怪我多此一举。

第一，水一触到炽热的物体，就会变成蒸汽，这时候它从炽热的物体上夺取了大量的热。从沸水转变成蒸汽所需要的热，相当于同量的冷水加热到摄氏 100 度所需要的热的五倍多。

第二，这时候形成的蒸汽所占的体积，要比产生它的水的体积大好几百倍；这么多的蒸汽包围在燃烧的物体外面，就使得物体不可能和空气接触，而没有了空气，燃烧也就不能进行了。

为了加强水的灭火力量，有时候还向水里加些火药！这看来似乎太奇怪了，可是这是完全有道理的：火药很快地烧完，同时产生大量不能燃烧的气体；这些气体会把燃烧着的物体包围起来，使燃烧发生困难。

怎样用火来熄灭火？

你也许听到过，最好的、有时也是唯一的跟森林或草原上的火灾作斗争的方法，是迎着大火的来向放火。新的火焰朝着猖獗的火海前进，消灭掉容易燃烧的物质，使大火失去燃料。两堵火墙遇在一起，就会立刻熄灭，好象彼此吞食掉了一样。

美洲草原里发生大火的时候，人们就曾经使用过这种方法来扑灭大火。关于这件事的叙述，许多人一定在库帕所写的长篇小说《草原》里读到过。一位老猎人把一些被困在草原上的大火里快要被烧死的旅客拯救出来这一段动人的情节，难道我们会忘掉吗？下面就是从小说《草原》里摘录下来的几段。

老人突然采取了断然的措施。

“是行动的时刻了，”他说。

“你想行动已经太迟了，可怜的老头子！”米德里顿叫道，“大火离开我们只有四分之一英里了，风又是用这样可怕的速度向我们这里吹！”

“是吗！火，我也不怎么怕它。好，孩子们，别尽站着！现在马上动手割掉这一片干草，清出一块地面来。”

在很短的时间里就清出了一块直径大约 20 英尺的地面。老猎人吩咐妇女们，说她们可以用被褥把自己那些容易着火的衣服盖起来，然后就领她们走到这块不大的空地的一边去。做了这些预防措施以后，老人就走到这块空地的另一边，那里大火已经象个高而危险的环境，把旅客们包围了。他拿了一束非常干的草放在枪架上点起来。容易燃烧的干草立

论家刊载在报章上。但是十分明显的，没有重量的空气在这种条件下并不一定就没有压力。空气在密闭的空间里有压力，完全不是因为它有重量，而是因为它是气态物体，它想无限制地膨胀。在地球表面的无边际的空间里，重力担任着阻止气体膨胀的墙壁的角色。这种看惯了的重力和压力的相互关系把批评我的人引入了迷途。

刻融融地烧着了。老人把烧着的干草扔到高树丛里，然后走到圈子中央，耐心地等待着自己行动的结果。

他放的这一把火贪婪地扑向新的燃料，一会儿功夫草也烧着了。

“现在你们可以看火怎样跟火作战了，”老人说。

“这不是更危险了吗？”吃惊的米德里顿大声叫道，“你不但没有把敌人赶走，反而把它引到身边来了。”

老人放的这把火越烧越大，同时向三方面蔓延开来。但是在第四方面却因为缺少燃料，熄灭了。随着火势的越来越大，在火前面出现的空地也越来越大了。这片刚出现的黑色发烟的空地，要比用镰刀割的草地光得多。他们刚才清除出来的这块地方就随着从其他几面包围着它的火焰而扩大开去，要不是这样的话，那避难者的处境是会变得很危险的。几分钟以后，各方面的火焰都后退了，只有烟还包围着人们，但是这对于人已经没有危险了，大火已经疯狂地向前面奔去了。

旁边的人同斐迪南王的延臣们看哥伦布竖鸡蛋一样，是怀着惊异的心情看这个老猎人的简易灭火法的。

但是这种跟草原和森林大火作斗争的方法，并不象初看的时候那样简单。只有极有经验的人才能利用迎火燃烧的方法来扑灭火，否则只会引起更大的灾祸。

如果你想一想下面这个问题，你就会明白做这件事为什么需要有丰富的经验：为什么这个老猎人所放的火会迎着火烧去，而不朝相反的方向烧呢？要知道风是从大火那方面吹来，把火带到旅客身旁来的。似乎这位老人所放的火应当不迎着火海烧去，而要顺着草原后退。假如当时真是那样，旅客们就不可避免地会被包围在火圈里烧死了。

那么这个老猎人到底有没有什么秘诀呢？

秘诀就在普通的物理原理的知识里。风虽然是从燃烧着的草原那一方面向旅客们吹来的，可是在火前面离火很近的地方，应该有相反的气流朝着火焰吹。原因是火海上面的空气热了以后会变轻，并且被没有遭到火灾的草原上来的各方面的新鲜空气排向上面。由此可知，在火的边界附近一定会有迎着火焰流去的气流。必须在火焰接近得能觉察出已经有空气在向大火流去的时候才动手迎着火放火。这也就是为什么这位老猎人不急于动手，而沉着地等待着适宜的时机的缘故。如果他在这种气流还没有出现的时候过早地把草燃着，那末火就会朝相反的方向蔓延开来，使人们的处境格外危险。可是也不能动手太迟，这也会把人烧死的，因为火逼得太近了。

能不能用沸水把水烧开？

拿一个小瓶（普通小玻璃瓶或药瓶），在里面灌些水，把它放在一个搁在火上的清水锅里。为了使小瓶不碰着锅底，应该把小瓶挂在铁环上。当锅里的水沸腾的时候，似乎瓶里的水也会跟着沸腾。可是不论你等多久，也等不到这个结果：瓶里的水会热，会非常热，但是总不会沸腾。沸水好象没有足够的热把水烧沸似的。

这种结果好象是出人意料的，可是它也是在意料之中的。为了把水烧沸，光是把它加热到摄氏 100 度是不够的，还必须再给它很大一部分

热，使水从液态变成气态。

纯水在摄氏 100 度的时候就沸腾。在普通条件下无论怎样对它再加热，它的温度不会再上升。这就是说，我们用来对瓶里的水加热的那个热源的温度既然只有 100 度，那它能使瓶里的水达到的温度也只有 100 度。这种温度的平衡一经来到，就不再会有更多的热量从锅里的水传到瓶里。

因此，用这种方法来对瓶里的水加热，我们就不能使它得到转变成蒸汽所必需的那份额外的“潜热”（每一克摄氏 100 度的水还需要 500 卡以上的热才能转变成蒸汽）。这就是小瓶里的水无论怎样加热总不能沸腾的缘故。

可能会发生这样一个问题：小瓶里的水和锅里的水有什么分别呢？要知道在小瓶里的也同样是水，只是同锅里的水隔着一层玻璃罢了，为什么瓶里的水就不能同锅里的水一样沸腾呢？

就是因为这层玻璃阻碍着瓶里的水，使它不能同锅里的水一起对流。锅里的水的每一个分子都能直接跟灼热的锅底接触，而瓶里的水就只能同沸水接触。

所以用沸的纯水来烧沸水是不可能的。可是如果向锅里撒一把盐，情况就不同了。盐水的沸点不是在摄氏 100 度，而是要略微高一些，因此，也就可以把玻璃瓶里的纯水烧沸了。

能不能用雪来烧沸水？

“如果说连用沸水来烧沸水都不行，那就更不必说用雪来烧了！”有的读者会这样回答。可是别先忙着回答，最好先做一个实验，哪怕就是用我们刚才用过的那种小玻璃瓶来做都可以。

在瓶里装半瓶水，把它浸在沸腾的盐水锅里。等瓶里的水沸腾了，就把瓶子从锅里拿出来，很快地用预先准备好的很紧的塞子把瓶口塞住。现在请你把瓶子倒过来。等到瓶里的水不再沸腾，就用沸水来浇瓶子——这时候水不会再沸腾起来。可是如果你在瓶底上放一些雪，或者就象图 86 所画的那样用冷水来浇它，这时候你就可以看到水又在沸腾了……雪竟做了沸水所不能做到的事情！

尤其叫人觉得莫名其妙的，是这个瓶子摸上去并不特别烫手，只是有些热罢了。可是你亲眼看到瓶里的水是在沸腾着啊！

这里的秘密在于雪把瓶壁冷却了，因此瓶里的蒸汽就凝成水滴。又因为瓶在水锅里沸腾的时候，瓶里的空气已经被赶了出去，所以现在瓶里的水受到的压力要比以前小得多。我们知道当加在液体上的压力减少的时候，它的沸点也会降低的。因此在我们这个瓶里，虽然也是沸水，但是并不怎样烫手。

如果瓶壁非常薄，那末瓶可能会因蒸汽的突然凝缩而发生某种类似爆炸的情况。外面空气的压力由于瓶里没有够大的抵抗力把它抵住，能把瓶子压破（顺便说起，你可以看出在这里用“爆炸”这个名词是不很合适的）。所以最好用圆形烧瓶（瓶底凸出的烧瓶），以便让空气压在拱形底上。

最安全还是用盛煤油或盛植物油的洋铁箱来做这个试验。用这种箱

子烧沸一点水以后，把箱盖旋紧，再用冷水浇它。这时候装满蒸汽的洋铁箱会被外面空气的压力压扁，因为箱里的蒸汽受冷以后已经变成水。洋铁箱会变形得象被重锤击过一样。

“气压计汤”

马克·吐温在他所写的《漫游国外记》里谈到他的一次在阿尔卑斯山上的旅行，里面的事实当然是臆造的：

我们的不愉快算是完结了；所以人们又能够休息一下，而我也终于有可能去注意这次远征的科学方面的工作了。首先我想用气压计来测量一下我们所在地的高度。可是遗憾得很，竟没有得到任何结果。我从读过的科学书里知道，也许是温度计，也许是气压计，必须煮了以后才能指示出度数来。究竟是哪一个应当这样，我现在可说不准，所以决定把这两种仪器都拿来煮。

然而还是得不到任何结果。我检查了这两件仪器，却发现它们都被煮坏了：气压计上只剩了一根铜指针，在温度计的盛水银的小球里，也只剩有一小点水银在晃动……

我找到了另一个气压计，这是一个全新的、极好的仪器。我把它放在炊事员煮着豆羹的瓦罐里，煮沸了半小时。这却使我得到了意外的结果：仪器完全不再起作用了，而汤却有了气压计的强烈的滋味。我们那位炊事员是个很聪明的人，就把菜单上的汤名换了一个新名字。这道新的菜大家都很赞美，使我不能不每天叫人拿气压计去做汤。气压计当然是全都损坏了，可是我并不怎样可惜它。它既然不能帮助我确定高度，我还要它做什么呢？

抛开里面的笑话不谈，让我们来回答一个问题：到底哪一个应该“煮”一下，是温度计还是气压计？

是温度计。从以前做过的试验里我们看到，水面上的压力越小，水的沸点就越低。因为随着山的上升，大气压力减小了，所以水的沸点也就应当跟着降低。事实上，我们也查出了纯水在各种不同的大气压力下的沸点。

沸点（摄氏）	气压
101°	787.7 毫米
100°	760 毫米
98°	707 毫米
96°	657.5 毫米
94°	611 毫米
92°	567 毫米
90°	525.5 毫米
88°	487 毫米
86°	450 毫米

在瑞士的伯尔尼，平均的气压是 713 毫米，所以那里的水的沸点在开着的器皿里已经是摄氏 98 度；而欧洲的勃朗峰，气压是 424 毫米，沸

水的温度就只有摄氏 84.5 度。每上升一公里，水的沸点要下降摄氏 3 度。所以我们如果测量出了水沸腾时候的温度（照马克·吐温的说法，就是如果我们把温度计“煮一下”），那末查一下相当的表，就可以知道这个地方的高度。为了这个，当然要预先准备好一张表，关于这一点，马克·吐温是“简直”忘记了。

为这个目的用的仪器叫做测高温温度计。这种仪器携带起来和金属气压计一样方便，可是它的精确度却比气压计高得多。

气压计当然也可以用来测量一个地方的高度。它不必“煮沸”就能直接指出大气的压力：我们升得越高，气压就越小。可是这时候也得要有表来告诉我们，空气的压力是怎样随着海拔的高度而减小的，或者得知道有关的算式。所有这一切，我们这位幽默家好象都没有弄清楚，所以才闹出了煮“气压计汤”的笑话。

沸水永远是烫的吗？

勇敢的勤务兵宾·茹夫——凡是读过儒勒·凡尔纳的长篇小说《赫克特·雪尔瓦达克》的读者，一定都跟他很熟悉——坚决地认为，只要是沸水，那就无论什么时候什么地方，都是一样热。大概如果不是机会凑巧把他跟他的司令官雪尔瓦达克一起被抛到了……彗星上，那他就会一辈子这样想。这个行踪不定的彗星同地球相撞了，并且恰好把地球上这两位主人公所在的地方撞了下来，使他们不得不跟着彗星的椭圆形轨道前进。就在这时候，这位勤务兵第一次在自己的经验里看出，沸水并不是到处都是一样热的。这个发现是他在准备早餐的时候意外得到的。

宾·茹夫把水倒进锅里，把锅放在炉子上。他等着水沸，以便把鸡蛋放进去。这些鸡蛋在他看来似乎是空的，因为它们很轻。

不到两分钟，水已经沸了。

“真见鬼！现在火是怎样烧的！”宾·茹夫高声说。

“不是火烧得更旺了，”雪尔瓦达克想了一想答道，“是水沸得更快了。”

于是他从墙壁上取下温度计，插在沸水里。

温度计告诉他沸水只有摄氏 66 度。

“啊！”军官叫道，“水竟不是在一百度沸腾，才到六十六度它就沸腾了！”

“是吗？长官？……”

“是的，宾·茹夫，现在你得把鸡蛋煮十五分钟才行。”

“那它们不都硬了吗？”

“不会硬的，老朋友，十五分钟刚够把它们煮熟。”

这种现象的原因，显然是大气的高度已经减小，地面上的空气柱大约已经缩短了四分之三。水在这样小的气压下，当然不到 100 度，到 66 度就沸腾了。同样的现象在高度达到 11,000 米的山上大概也会出现。假如这位军官身边有一个气压计，它一定会把气压降低的情况告诉他。

对于这两位主人公所见的现象，我们倒不必去怀疑：他们说水在 66 度就沸腾了，我们可以把它当做事实。可是我们十分怀疑，他们生活在这样稀薄的大气里，怎样会还觉得很好过。

《雪尔瓦达克》的作者说，类似的现象也可以在 11,000 米的高处看到，这是完全正确的。在那里，一算就可以算出，水的沸点的确应当是摄氏 66 度。不过在这种地方，空气的压力应当等于高 190 毫米的水银柱——恰好是正常气压的四分之一。在稀薄到这种程度的空气里，呼吸差不多已经不可能了！因为这样的高度已经是在平流层里了！我们知道，不带氧气面具飞到这种高度的飞行员，会因为空气不够而失掉知觉，而雪尔瓦达克和他的勤务兵竟觉得还可以过去。好在雪尔瓦达克手里没有气压计，否则小说家也许还要强迫这个仪器不照物理学原理报告气压哩。

假如这两位主人公不是落在这个幻想的彗星上，而是落到了大气压力不到 60 - 70 毫米的火星上，那他们的沸水还要凉些——只有摄氏 45 度。

相反的，在气压比地面高得多的深矿井的底部，却可以得到十分热的沸水。在深达 300 米的矿井里，水要到 101 度才沸腾，在深达 600 米的深处是 102 度。

蒸汽机的锅炉里的水也是在极高的压力下沸腾的，所以它的沸点也极高。例如在 14 个大气压下，水的沸点是摄氏 200 度。反过来，在空气泵的罩子底下，可以使水在普通的室温里剧烈地沸腾起来。那就是说，我们在摄氏 20 度的时候就能够得到沸水。

烫手的冰

刚才我们谈过了凉的沸水。还有一种更奇怪的东西：热冰。我们习惯上认为，水的固体状态不能在零度以上存在。可是物理学家布里治曼的研究告诉我们却不是这样：在极高的压力下，水能够在比零度高得多的温度里变成固体，并且保持固体状态。布里治曼又指出，冰不止有一种，而有好几种。有一种他叫它做“第五种冰”的冰，是在 20,600 个大气压下得到的，它在摄氏 76 度的温度里还能保持着固体状态。它可能会烫坏我们的手指，假如我们能够摸到它的话。可是我们没有可能跟它接触，因为“第五种冰”是在最好的钢制成的厚壁容器里用极强的压力机加上极大的压力才制成的。所以我们不能看到它或用手拿它。我们只能用间接的方法来知道这种“热冰”的性质。

说来很有趣，“热冰”的密度比普通冰高，甚至比水高：它的比重是 1.05。它在水里应该会下沉，而不象普通冰那样会浮在水面上。

用煤来取冷

煤是用来取暖的，但是用它来取冷也不是什么不可能的事。在一种

如果象我们前面说的那样（第 183 页），每升高一公里，水的沸点要降低摄氏三度，那末为了使水的沸点降低到 66 度，就必须升高到 $34 \div 3 = 11$ 公里的地方。

叫做“干冰”的制造厂里，每天都在用煤取冷。在这种工厂里，人们把煤放在锅炉里燃烧，然后把得到的烟道气炼净，并且用碱性溶液吸收里面所含的二氧化碳气。再用加热的方法把纯净的二氧化碳气从碱性溶液里析出来，放在70个大气压下冷却和压缩，使它变成液体。这液体的二氧化碳就装在厚壁的筒子里，送到汽水工厂和其他需要它的工厂里去使用。它的温度已经低到可以使土壤冻冰。在建筑莫斯科地下铁道的时候，就曾经利用它做过这个工作。可是有许多地方还得使用固体二氧化碳，固体二氧化碳就叫干冰。

干冰，就是固体的二氧化碳，是让液体二氧化碳在低压下迅速蒸发而制成的。一块块的干冰，就外形看来，与其说它象冰，不如说它象压紧的雪。一般说来，它在许多方面都和冰有分别。二氧化碳的冰比普通冰重，在水里会下沉。它的温度虽然非常低（摄氏零下78度），可是你如果小心地拿一块放在手里，你的手指却觉不出它冷：当我们身体和它接触的时候，它就产生二氧化碳气，保护你的皮肤不受冷。只有在紧紧握住干冰块的时候，我们的手指才会有冻伤的危险。

“干冰”这个名称非常能说明这种冰的主要物理性质。它自己无论在什么时候都不会湿，同时也不会润湿周围任何东西。受了热它立刻变成气体，并不经过液体状态：二氧化碳是不能在一个大气压下存在有液体状态的。

干冰的这一特性和它的十分低的温度结合在一起，就使它在实用上变成了没有别的东西可以替代的冷却物质。用二氧化碳的冰来冷藏食物，不但不会潮，并且还因为形成的二氧化碳气有抑制微生物生长的能力，保护食物不腐败，因此在食品上不会出现霉菌和细菌。昆虫和啮齿类动物也不能在这种气体里生活。最后，二氧化碳气还是一种可靠的防火剂：把几块干冰抛在燃烧着的汽油里，就能使火熄灭。干冰在工业和日常生活里都有广大的用途。

“饮水小鸭”

有一种中国的儿童玩具，谁见了都觉得奇怪。它的名字叫“饮水小鸭”。把这小鸭放在一杯水前面，小鸭就会俯下身去把嘴浸到怀里，“喝”完一口水，又直立起来。可是直立一会儿，又会慢慢俯下身去，等到鸭嘴够到了水，“喝”了一口，又会直立起来。这种玩具是“不花钱”的发动机的一个典型。它的活动的机构是很巧妙的，请看图89，小鸭的“身体”是一根玻璃管，管的上端是一个小球，做成鸭头的样子，连着扁嘴。管的下端连一个较大的玻璃球，也是密封的。球里面装有液体，玻璃管下端浸没在液面下。

要使小鸭能够活动，必须用水打湿鸭头。鸭头打湿以后，有一段时间小鸭还能保持直立的姿势，因为下端的玻璃球和里面的液体比鸭头重。现在看它会发生什么变化。我们看到液体开始沿着玻璃管上升（图90）。当液面升到玻璃管上口的时候，上部就变得比下部重，于是小鸭就嘴向前把身子俯到杯子上。当小鸭的身子俯到水平位置的时候，下端玻璃管的开口就会露出液面来，玻璃管里的液体也就流回下端的大玻璃球。于是小鸭的“尾部”又变得比头部重，使小鸭恢复直立的位置。现

在我们明白了这个问题的力学方面的作用：液体的升降改变了重力的分布情况，简单地说，就是改变了重心。可是使液体上升的，又是什么力量呢？

小鸭内部的液体是醚。醚在室温里很容易蒸发，而醚的饱和蒸气所产生的压力又会随温度的改变而剧烈改变。

在小鸭直立着的时候，可以看出有两个独立的醚蒸气区域：一个在头部，一个在尾部。

鸭子的头部有一种奇妙的性能：只要用水把它打湿，那里的温度就会变得比周围温度稍微低一些。要做到这一点也不困难，只要把鸭头的表面用善于吸水又容易让水分蒸发的多孔材料来做就成了。水分剧烈蒸发的时候，鸭头上的温度会变得比下面玻璃管和大玻璃球里的温度低。这又转过来会使头部那个小玻璃球里的饱和蒸气冷凝，压力也就随着降低。于是下部那个大玻璃球里的比较大的压力就会挤压液体，使它顺着玻璃管上升。重心移动位置了，小鸭就慢慢俯下身子一直到水平的位置。在这个位置里，有两个过程各自独立地进行着。第一，小鸭的嘴浸了一下水，这样就又把自己头上的棉套子打湿。第二，上下两部分的饱和蒸气混合了，压力也变得一样了（由于吸收了周围空气的热量，蒸气的温度略有上升），同时玻璃管里的液体，也在本身的重量作用下流入下端的大玻璃球。于是小鸭又直立了起来。

这个玩具会不断地自动活动下去，只要让它头上的棉套子继续被打湿，而周围空气的湿度又不太大，能够保证正常的蒸发，也就是保证头部的温度能够相对地降低。这样看来，小鸭头部的水不断蒸发所吸取的周围空气的热量，就是使这种奇妙的小鸭能够活动的原动力。这种小鸭是“不花钱”的发动机的一个极其明显的例子，但它并不是什么“永动机”。

第八章 磁和电

“慈石”

中国“磁石”这个名字，就是从“慈石”转变过来的，意思是，磁石吸引铁就象一个慈爱的母亲吸引自己的孩子一样。奇怪的是，居住在欧亚大陆另一端的法国人也是用类似的名称来称呼磁石的。法文“aimant”这个字也有“吸引”和“慈爱”的意思。

磁石的这种“慈爱”力量并不很大，所以希腊人称呼磁石做“赫丘利石”是过于天真的。如果古代希腊人对磁石的那种微弱的吸引力都这样惊奇，那末当他们看到现代冶金工厂里的磁铁一次可以举起几吨的重量，又该叫它做什么呢？当然，这不是天然的磁石，而是电磁铁，就是把电流通过铁心周围的线圈使铁磁化制成的。但是在这两种情况下起作用的都是同一种性质——磁性。

我们不能认为，磁只能对铁起作用。有许多物体也能受强大的磁力的作用，虽然不象铁那样显著。金属当中的镍、钴、锰、铂、金、银、铝都能被磁铁吸引，只是被吸引的力比较小。还有一些所谓反磁性的物体，例如锌、铅、硫、铋，性质尤其特别：它们能被强大的磁铁所排斥！

液体和气体也有被磁铁吸引或排斥的性质，不过作用十分微弱；必须是非常强大的磁铁，才能显示出对这些物质的作用。例如纯净的氧气就有顺磁性，就是说，磁能够吸引它。如果我们在肥皂泡里装满氧气，然后把它放在强大的电磁铁两极中间，这时候肥皂泡就会受那看不见的磁力的牵引，在两极中间伸长开来。放在强大的磁铁两极中间的烛光会改变自己的通常的形状，明显地告诉了我们它对磁力的敏感性（图 91）。

关于指南针的问题

我们向来都认为，指南针永远是一头指北，一头指南的。如果有人向我们提出下面这个问题，我们一定会觉得这问题是荒谬的：在地球上什么地方，指南针两头都指北？

同样荒谬的是问：在地球上什么地方，指南针两头都指南？

碰到这样的问题，你会肯定说，在我们地球上是没有、也不可能有这样的地方的。可是事实上这样的地方是有的。

我提醒你一下，地球的磁极同地理上的南北极并不一致。这样你也许就会猜到所问的地点是在地球上的什么地方了。我问你，放在地理的南极上的指南针，它指的是什么方向呢？它的一头当然要指着附近的那个磁极；另一头指着和这相反的一方。可是你从地理上的南极出发，无论走哪个方向，你都是向北走的。地理上的南极没有别的方向。在它四周，处处都是北方。所以放在那里的指南针两头都是指北的。

同样，如果把指南针移到地理上的北极，那末它的两头都应该指南了。

赫丘利是希腊神话中一位大力士的名字。

磁力线

图 92 是照着像片画下来的一张有趣的图画：画上有一个人人的臂膊横放在电磁铁的两极上，臂膊上向上竖着一簇簇铁钉，好象刚毛一样。臂膊本身是完全感觉不到磁力的：看不见的磁力线穿过臂膊的时候，是一点也不会暴露自己的存在的。可是这些铁钉在磁力的作用下，却顺从地按照一定的次序排列着，让我们看到那些依着曲线从一极走向另一极的磁力线的方向。

人类没有能感觉磁性的器官；所以我们只能推测在每一块磁铁的周围都有磁力。可是用间接的方法来显示磁力的分布图也并不很困难。做这个试验最好是用铁屑。在一张光滑的厚纸或玻璃板上均匀地撒上一薄层铁屑；拿一块普通磁铁放在厚纸或玻璃板下面，再轻轻敲厚纸或玻璃板来抖动铁屑。磁力是能自由地穿过厚纸或玻璃板的，所以铁屑在磁铁的作用下就要磁化；磁化了的铁屑在我们抖动它们的时候，就会和厚纸或玻璃板分开，并且在磁力的作用下很容易转过身来，落在磁针在这一点应取的位置上，也就是沿着磁力线排列起来。结果使我们明显地看出那些看不见的磁力线是怎样分布的，得到象图 93 所画的图。磁力造成了一组复杂的弯曲的线。你可以看出铁屑怎样从磁铁的每一极辐射开来，又怎样在两极中间连接起来，形成一些短弧和长弧。这样，铁屑就让我们亲眼看到了物理学家所想象的情景，就是每一块磁铁周围存在着的看不见的情景。离磁极越近，铁屑组成的线就越密，越清楚。相反地，离磁极越远，线就越稀，越不清楚。这就明白地向我们证明了，磁力线是随着距离的加长而变弱的。

怎样使钢磁化？

读者常常会提出这个问题。为了答复它，首先应该说明磁铁跟没有磁化的钢有什么分别？含在磁化了的或是没有磁化的钢里的每一个铁原子，我们都可以看成是一个小磁铁。在没有磁化的钢里，这些原子磁铁是没有次序地排列着的。因此，里面每一个小磁铁的作用，都被相反方向排列着的小磁铁的作用所抵消（图 94A）。相反地，在磁铁里，所有那些基本小磁铁都整齐地排列着，所有同性的磁极都朝着同一方向，象图 94B 那样。

当我们用一块磁铁来摩擦钢条的时候，会产生些什么情况呢？磁铁会用自己的吸力使钢里的基本小磁铁转过身来；让同性的磁极都朝着同

设想一下我们如果有了直接能感觉到磁性的器官，就会觉得怎样，那倒是很有趣的。据说，有人曾经成功地把一种磁性感觉移植在龙虾身上。他看出小龙虾会给自己的耳朵装进极小的石头；这些小石头由于自己的重量能对龙虾的部分平衡器官——感觉纤维——起作用。类似的小石头叫做耳石的，人类的耳朵里也有，位置就在基本的听官附近。它们是在竖直的方向里起作用的，所以能指出重力的方向。他就给龙虾移植上了一些铁屑来代替小石头，当时龙虾并不觉得怎样。可是在把一块磁铁拿到龙虾身边的时候，龙虾就使自己的身体落在一个平面上，这平面跟磁力和重力的合力垂直。近年来，人们把上面说的这个试验的形式改进了一下，成功地应用在人身上。有人曾经把一些小铁屑粘在人的耳鼓膜上，结果，人耳就能象察觉声音的振动一样，察觉磁力的振动。

一方向。图 94C 清楚地指出这种情况：基本小磁铁一开始就使自己的南极指向磁铁的北极。等磁铁移过一段路，它们就顺着磁铁运动的方向排列起来，使所有的南极都朝着钢条的中部。

从这里也容易明白，在使钢块磁化的时候，应该怎样来运用磁铁：应该把磁铁的一极放在钢条的一头，紧紧地压在上面，然后顺着钢条擦过去。这个方法是最简单也是最古老的一种磁化法，只适宜用来制取很小而且力量很弱的磁铁。强大的磁铁是利用电流制取的。

庞大的电磁铁

在冶金工厂里，可以看到搬运十分重的重物的电磁起重机。这种起重机在举起和移动铁块的工作上对铸钢厂和这一类的工厂作了相当大的贡献。几十吨重的大铁块或机器零件，都不必捆扎就能很方便地用这种磁铁起重机来搬运。铁片、铁丝、铁钉、废铁和别的各种铁料，用别种方法来搬运都很麻烦，用了电磁起重机，就能不装箱不打包，很方便地搬来搬去。

在图 95 和 96 里，你们可以看到磁铁的这种有效的功用。要收集和搬运一堆堆的铁片是非常麻烦的，可是象图 95 所画的强大的电磁起重机却能够同时收集和搬运它们。这里的好处不但是力量经济了，并且工作简化了。在图 96 里你可以看到电磁起重机搬运装在木桶里的铁钉，一次竟可以举起 6 桶！有一家冶金工厂在不久以前使用了四台电磁起重机，每一台起重机可以一下子搬运十根铁轨；这些起重机就代替了二百个工人的体力劳动。在起重机工作的时候，用不着担心这些重物在上面缚得牢不牢。只要电磁铁的线圈里电流不停，那就一块碎片也不会从上面落下来。看不见的磁力比坚固的螺钉和链条都更可靠。

可是如果线圈里因为某种原因断了电，那就必然要闯祸了。这样的事故从前曾经发生过。我们从一本技术杂志里可以读到这样一则消息：“在美国一家工厂里，电磁铁举着用牛皮装来的铁块，准备把它们投进炉里。突然尼亚加拉瀑布的发电站出了事故断了电。巨大的金属块从电磁铁上掉下来，整个砸在工人头上。为了避免再发生类似的不幸事件，并且为了节省电能的消耗，就在电磁铁上装了特别的装置。在要运输的物体被磁铁提起来以后，就有些坚固的钢爪子从旁边落下来紧紧地扣住它们，随后重物就由这些爪子提着；而电流在搬运的时候却可以中断一会。”

图 95 和 96 所画的这两台电磁起重机，直径都有 1.5 米；每台起重机能提起 16 吨重物（一节货车的重量）。一台这样的电磁起重机一昼夜可以搬运重物 600 吨以上。有一些电磁起重机一下子能提起 75 吨重物，也就是整个机车的重量！

看了电磁起重机的工作情况以后，有的读者可能会有一种想法：如果使用电磁起重机来搬运灼热的铁块，那该多方便啊！可惜这只有在一定的温度里才能这样做，因为灼热的铁是不能磁化的。磁铁被加热到摄氏 800 度就会失去磁性。

现代的金属加工技术广泛地使用着电磁铁来支持住和移动钢、铁和铸铁的铸件。人们已经造成了几百种不同的卡盘、工作台和别种装置，

大大地简化了和加速了金属加工过程。

磁力魔术

魔术师有时候也使用电磁铁，很容易想象出，他们借这种看不见的力量会表演出多么精彩的戏法。《电的应用》这本名著的作者达里，曾经谈到一位法国魔术师演出时候的情况。他那一场戏法，在不知道内容的观众看来，真好象是有妖术似的。下面是那个魔术家的话：

在台上有一个不大的包着铁皮的箱子，箱盖上装有提手。我向观众说，请他们当中来一位气力大的人。有一位身材适中可是体格强壮的大力士应召上了台。他很有精神和满怀着自信心，略微带点开玩笑的态度，微笑着站在我的身旁。

“你力气很大吗？”我从头到脚打量着他，问道。

“是的，”他满不在乎地回答我。

“你相信你总是很有力气吗？”

“我完全有信心。”

“你错了，一会儿工夫我就能使你失去力气，使你软弱得象个小孩子。”

大力士轻蔑地微笑了一下，表示他不相信我的话。

“上这儿来，”我说，“提这个箱子。”

大力士弯着腰提起箱子，高傲地问道：

“还要做什么？”

“稍微等一等，”我回答。

这以后，我装出一副严肃的样子，并且用发命令的手势和庄重的声调对他说：

“你现在比女人还要软弱了。你再提一下这箱子看。”

大力士一点也没把我的魔术看在眼里，立刻又去提箱子。可是这一次箱子却出现了反抗力，无论他怎样用力，总不能挪动它，它好象固定在那里一样。这位大力士所用的力气的确是可以举起极大的重量的，可是这次却完全不顶事。他累得直喘气，最后只得羞惭满面地离开戏台。现在他开始相信魔术的力量了。

这位法国魔术师所表演的这场魔术的秘密很简单。原来箱子的铁底是放在一个强大电磁铁的磁极上的。在没有电流的时候，箱子是不难提起的；可是电磁铁的线圈里一通电，那就是两三个人也别想挪动它了。

电磁铁在农业上的用途

磁铁还有一种用途，说来更有趣味：它能在农业上帮助农民除掉作物种子里的杂草种子。杂草种子上有绒毛，能够粘在旁边走过的动物的毛上，因此它们就能散布到离母本植物很远的地方。杂草的这种在几百万年的生存斗争中获得的特点，却被农业技术利用了来除掉它的种子。农业技术家利用磁铁，把杂草的粗糙的种子从作物的种子里挑选出来。如果在混有杂草种子的作物种子里撒上一些铁屑，铁屑就会紧紧地粘在

杂草种子上，而不会粘在光滑的作物种子上。然后拿一个力量足够强大的电磁铁去对它们作用，于是混合着的种子就会自动分开，分成作物种子和杂草种子两部分：电磁铁从混合物里把所有粘有铁屑的种子都捞了出来。

磁力飞机

在这本书的第一节，我曾经提到过法国作家西拉诺·德·别尔热拉克的有趣著作《月国史话》。书里所谈的事情很多，有一件谈到一种有趣的飞机。这种飞机是靠磁力来飞行的，小说里的主人公就曾经乘着它飞到月球里。现在让我把书里的这一段直译在下面：

我叫人制造了一辆很轻的铁车；上了铁车并舒服地坐好以后，我就把一个磁铁球向上抛去。铁车于是也立刻跟着上升。当我每一次接近磁球吸引我去的地方，我就重新把球往上抛。有时候，我只是简单地用手将球略微举高一些，铁车也会跟着上升去和磁球接近。在把球向上抛了许多次，铁车也上升了许多次以后，我就来到了我在月球上降落的地方。因为这时候我的手紧紧地握着磁球，所以铁车也紧靠着我不会离开。为了在降落的时候不跌伤，我就这样地抛球，使铁车的下降速度因球的吸引力而减慢。当我离开月面只有二三百俄丈的时候，我就向降落的方向成直角地抛球，直到铁车十分接近月面为止。这时候我就跳出铁车，轻松地降落在沙上！

这里所描写的飞机是毫无用处的，关于这一点，无论是小说的作者或者读者，当然都不会怀疑的。但是我想一定有许多人不能正确地说出到底为什么这种设计会没有用处：是因为坐着铁车不能向上抛球呢，还是因为磁球不能吸引铁车？

不是的。坐在车里抛球是可以的，并且磁球有足够强的磁性的话，它也能够吸引铁车。尽管这样，这种飞机还是一点也不能向上运动的。

你曾经从小船上往岸上抛过重的东西吗？如果你抛过，那毫无疑问，你一定曾经注意到小船在这时候会向河心退去。你的肌肉在对所抛的物体加上推力使它向一个方向前进的时候，同时也把你的身体（连同小船）推向相反的方向。这里出现的就是我们以前说过许多次的作用力和反作用力相等的定律。在抛磁球的时候，这个定律也会发生作用。坐在车上用很大力气（因为球要吸引铁车）抛着磁球的人，不可避免地要把整个铁车往下推。等到后来磁球和铁车由于相互吸引而重新接近的时候，它们只是回到了原来的位置。因此很明显，就算铁车一点重量也没有，用抛磁球的方法也只能使它依某一个位置做中心上下摆动。用这个方法来使它一步步前进是不可能的。

西拉诺是十七世纪中叶的人，这时候作用和反作用的定律大家还不知道，所以要求这位法国讽刺作家能够清楚地说出自己这个开玩笑的设计不合实用的道理，也是不切实际的。

1 俄丈约合 2.134 米。

同“穆罕默德的棺材”一样

有一次在用电磁起重机工作的时候，出现了一种有趣的情况。有位工人，看见电磁铁吸起了一个很重的铁环，环上有条短链子，链子固定在地板上，所以环和磁铁并不能接触：在环和磁铁之间还留着一掌宽的空隙。这时候的景象真是特别：一条链子竖直地朝上立在那里！磁力竟大到在链上攀着一个工人也能保持竖直。这时候恰好来了一位摄影家，赶着这有趣的时刻，把这情况摄了下来。我们在这里重印了这张悬在空中很象传说里的穆罕默德的棺材一样的人像（图 97）。

这里就顺便来谈谈“穆罕默德的棺材”。伊斯兰教徒都深信那装着“先知”的遗体的棺材是上下没有任何支撑地悬在坟墓里的。

这是不是可能呢？

欧拉在他的《有关各种物理学资料的书信集》里曾经说道，“相传穆罕默德的棺材是由某种磁力支持着的；这似乎不是不可能的，因为有些人造磁铁是能举起 100 磅重量的。”

这样的解释是没有根据的；即使用上面说的方法（就是利用磁铁的吸引力）可以在一个时候里得到平衡，可是很小的推力，甚至空气的很小的动荡，也足够破坏它。这时候棺材不是落到地上，就是被吸向天花板。要使它保持不动，实际上是不可能的，就象不能使一个圆锥体立在它的顶点上一样，虽然在理论上这样竖立是可能做到的。

不过，应用磁石，也的确完全可以产生象“穆罕默德的棺材”这种现象，——只是所利用的不是它们之间的相互吸引力，相反的，是它们之间的相互排斥力。（磁铁不但能够相吸而且能够相斥这一点，连刚学习过物理学的人都常常会忘记。）大家都知道，同性的磁极是彼此排斥的。如果把两块磁化了的铁这样来放，使它们的同性磁极上下相迭，那它们就会相互排斥。如果上面一块磁铁的重量选择得当，就不难使它悬在下面一块的上面，而不跟它接触，维持着稳定平衡的状态。只需要几根用不能磁化的材料（象玻璃之类）做的支柱，就可以阻止上面那块磁铁在水平的平面上转动。传说里的穆罕默德的棺材可能就是在这类情况下悬在空中的。

最后，如果用磁铁的吸引力来影响运动着的物体，也可以出现这种现象。有人根据这种思想设计了一种没有摩擦力的电磁铁路（图 98）。这个设计富有教育意义，把它介绍给每一个爱好物理学的人，是有益处的。

电磁运输器

这表明电磁铁的力量非常强大，因为磁铁的吸引力是随着电极和被吸引的物体之间的距离加大而大大地减弱的。如果有一个蹄形磁铁，它和物体直接接触的时候，能吸引 100 克重物，那末在磁铁和重物之间隔一张纸，它的举重力就要减小一半。这也就是为什么一般不在磁铁的两端涂漆的缘故，虽然漆有防锈的作用。

这段话是在 1774 年写的，那时候电磁铁还没有发明。

在这种电磁铁路上，车厢的重量被电磁铁的吸引力抵消了，所以它是完全没有重量的。所以如果我告诉你说，根据设计，这些车厢不是在铁轨上行驶的，不是在水里航行的，甚至也不是在空气里滑翔的——它们飞的时候任何支撑的东西都没有，什么也不接触，而是悬在看不见的强大的磁力线上的，你听了也就不会觉得奇怪了。由于它们不会受到一些摩擦，所以一当它们进入运动状态，就能依靠惯性保持着原有的巨大速率前进，而不必再用机车来牵引。

这个计划是这样实现的。车厢是在抽出了空气的铜管里运动的，使空气的阻力不妨碍车厢的运动。车厢底部的摩擦力也得消灭掉，方法是让车厢在运动的时候不同管壁接触，而由电磁铁的力量把它维持在空中。为了这个目的，沿路在管子上面每隔一定距离得设置一个极强大的电磁铁。这些电磁铁吸引着在管里运动着的铁制车厢，不让它们掉下去。磁铁力量的大小，应当刚能使这些在管里奔驰着的铁制车厢总是留在管的“天花板”和“地板”之间，不让它接触任何一方面。电磁铁把在它下面奔驰着的车厢吸向上面——可是车厢并不能因此就碰到“天花板”，因为还有重力在拉它。在它刚要碰到“地板”的时候，下一个电磁铁又把它吸了上去……这样，这个始终被电磁铁抓着的车厢，就沿着一条波状线在真空中奔驰，没有摩擦，也没有推力，象宇宙空间里的行星一样。

那末车厢是什么样的呢？车厢象雪茄烟形状的圆筒，高 90 厘米，长大约 2.5 米。当然车厢还得严密地关闭着——因为它是在没有空气的空间里运动的。里面还得象潜水艇一样，有自动清洁空气的装置。

开动车厢使它出发的方法，也同以前所用的一切方法全不相同。也许只能拿放射炮弹来比喻它。而实际上这种车厢也真是象炮弹一样“射出”去的，不过所用的是电磁炮罢了。发射车厢的车站是根据螺线管的性质建造的，“螺线管”的导线在有电流通过的时候会吸引铁心。这个吸引过程进行得这样快，以致在足够长的线圈和足够强的电流的情况下，铁心能够获得极高的速度。在新式的磁力铁路上用来发射车厢的，正是这种力量。因为在管的内部没有摩擦力，所以车厢的速度不会减小；它会按照惯性原理疾驰，直到车站上的螺线管命令它停止为止。

下面是设计者提出的一些详细情节。

我最初是用铜管来做的（铜管的直径是 32 厘米），在它的上面有许多电磁铁，电磁铁下面的支架上有小车——那是一节铁管，前后都有轮子，前面装着“鼻子”，“鼻子”撞在一块由沙袋支住的木板上的时候，小车就会停止。小车的重量是 10 公斤。速度可以达到每小时大约 6 公里。超过这个速度，就由于屋子和环形管的面积的限制（环形管的直径是 6.5 米），车就不能行驶。但是在我后来完成的设计里，出发站上的螺线管长到了 3 俄里。这样，车的速度就很容易达到每小时 800—1000 公里。又因为管里没有空气，车同地板和天花板之间没有摩擦，所以在它的持续行驶中不会消耗任何能量。

尽管建造的费用，特别是铜管本身的建造费用很大，可是毕竟不必在维持速度上消耗能量，又不必用驾驶员和车务员等等，所以每一公里

的费用也只有千分之几戈比到百分之1-2戈比。而双线每一昼夜的运输量，无论是上行或下行，都可以多到15000人或10000吨货。

火星人和地球上的人交战

古罗马的博物学家普林尼传下了当时曾经流行的一个关于磁铁山的故事，说在印度海边某处有这么一座山，它有一种非常的力量，能够吸引任何铁制的东西。所以如果有水手胆敢把他们的船驶近这座山，那他一定会倒楣的。山会把船上所有的铁钉、铁螺钉等都拔去，使船分解成一块块的木板。

这个传说后来又编入了《一千零一夜》里。

当然，这不过是传说。现在我们知道，磁铁山或含有丰富的磁铁矿的山的确是有的。但是这种山的吸引力非常小，几乎等于零。象普林尼所写的那种山，在地球上从来没有过。

在今天，如果我们不用铁和钢来造船的部件，那并不是因为我们怕磁山，而只是为了这样研究地磁更合适。

科学小说家库尔特·拉斯维兹却利用普林尼传说里的思想，想出了一种可怕的武器，这种武器被他的小说《在两个星球上》里的火星星人使用了来同地球上的军队作战。火星星人拥有这种磁性武器（大概就是电磁铁），简直不必同地球上的居民作战，在开战以前就解除了地球上的军队的武装。

下面就是这位小说家所描写的关于火星星人和地球上的居民交战时候的情节：

一队出色的骑兵勇猛地向前冲上去了。并且看上去，似乎我们军队的奋不顾身的战斗意志终于迫使强大的敌人想退却了，因为他们的飞船已经采取了新的行动。它们飞上了高空，好象集合了准备撤退。

可是在这同时，从上面落下了一种张得很开的黑色的东西，现在刚出现在战场上空。这个四周都有空中船舶环绕着的东西，象飘扬着的被单一样，很快地在战场上空大大地展开了。这里的骑兵第一连已经落在它的作用范围里了，——奇异的机器立刻把整个团遮盖住了。它的作用是意外的，古怪的！从战场上传来了惊心动魄的号叫声。马和骑士一堆堆地散乱在地上，而空中却象乌云一样满布着刀剑和马枪，它们砰砰拍拍地都向机器飞去，并且粘附在上面。

机器略微向旁边滑过去了一些，把自己虏获的铁器都扔在地上。它又两次飞了回来，并且收缴了差不多地面上所有的兵器。当时没有一个人有力量能够抓住自己的刀枪不放手。

这种机器是火星星人的一种新发明：它有一种不可抗拒的力量，能够把一切钢和铁做的东西吸引过去。火星星人靠这种飞翔在空中的磁铁的帮助，从敌人手里夺得了武器，而自己却又受不到丝毫伤害。

空中磁铁很快地继续向步兵逼近。那些步兵拚命用双手抓住自己的枪，可是不顶事，——不可抗拒的力量还是把它们从手里夺走了；许多

不肯放手的，连人带枪都被吸到了空中。几分钟里第一团全被缴了械。机器又向前飞去，去追赶那正在城里行进的一团，使他们受到同样的遭遇。

接着，炮队也落入了同样的命运。

表和磁

读完了上面一段文字后，自然会产生一个问题：难道我们就不能防御磁力的作用，就不能用某种磁力透不过的障壁把它挡住吗？

这是完全能够的。假如预先采取了适当的措施，那个幻想出来的火星人的发明也是可以防御的。说也奇怪，不能透过磁性的物质，原来就是容易磁化的铁本身！一个放在铁制的环里的罗盘，它的指针不会被放在环外的磁铁吸引，就是明证。

铁壳可以保护怀表里的钢制机件不受磁力的影响。假如你把一个金表放在一个强力的蹄形磁铁的磁极上，那末所有钢制机件，首先是那摆轮上的游丝，就会磁化，使表停止不走。就是把磁铁拿走以后，你也不能把表恢复到原来状态，因为钢制机件都保留着磁性。你得把表彻底修理一下，把许多机件换成新的。因此，切不要用金表来做这个试验：它太贵了，坏了可惜。

可是，如果你有一个紧密地盖着铁壳或钢壳的表，就可以大胆地去做这个试验，——磁力不能透过钢和铁。你如果把这样的表拿近强大的发电机的线圈附近，它的精确度一点也不会受到影响。所以对一个电气技工来说，这样便宜的表倒是最理想的表；至于金表和银表，很快就会因为磁的作用变成没有用处。

磁力“永动机”

在人类想发明“永动机”的历史里，磁铁也曾经扮演过不太小的角色。失败的发明家曾经费尽心思想利用磁铁来建造自己能够永远运动下去的机器。下面介绍的一种磁力“永动机”，是十七世纪的英国人约翰·维尔金斯（捷斯特城的主教）设计的。

在小柱上（图 100）放一个强力的磁铁 A。两个斜的木槽 M 和 N 迭着倚靠在小柱旁边。上槽 M 的上端有一个小孔 C，下槽 N 是弯曲的。这位发明家想，如果在上槽上放一个小铁球 B，那末由于磁铁 A 的吸引力，小球会向上滚；可是滚到小孔处，它就要落到下槽 N 上，一直滚到 N 槽的下端，然后顺着弯曲处 D 绕上来，跑到上槽 M 上。在这里，它又受到磁铁的吸引，重新向上滚，再从小孔里落下去，沿着 N 槽滚下去，然后再经过弯曲处回到上槽里来，以便重新开始运动。这样，小球就会不停地前后奔走，进行“永恒的运动”。

这个发明的荒谬的地方在哪里呢？

要指出它也并不难。为什么发明家认为小球沿着 N 槽滚到它的下端

这只是指一种不是用特殊的叫做因钢的合金制的游丝而说的。在镍铁合金的成分里虽然含有铁和镍，但是不会磁化。

以后，还会有一种速度，使它能够顺着弯曲处 D 绕到上面来呢？假如小球只是在重力这一个作用下滚动的，那它是不难顺着弯曲处上升的，因为那时候它是加速地向下滚的。可是我们这小球是在重力和磁力这两种力量的作用下滚着的。并且磁力是这样强，可以强迫小球从位置 B 上升到 C。所以小球沿着 N 槽滚动的时候是不能加速前进的，而是要变慢的；即使它能滚到 N 槽的下端，也无论如何不能积蓄起一种速度，使自己能绕着弯曲处 D 上升。

上面所说的那个设计，后来在改变了形状的情况下又重新出现了许多次。有一种类似的设计，说也奇怪，竟在 1878 年，也就是在能量守恒定律确立以后三十年，在德国取得了专利权！这位发明家把他那磁力“永动机”的荒谬的基本观念竟掩饰得这样高明，甚至迷惑了颁发专利特许证的技术委员会。虽然按照章程，凡是和自然定律相矛盾的发明，都不应当发给发明专利特许证，这一次发明却取得了专利权。但是这个唯一获得“永动机”专利权的幸运儿大概很快会对自己的创造失望，因为只过了两年，他就停止缴纳专利税了，并且这种可笑的专利也丧失了法律效力：“发明”成了大家的财产，但是谁也不需要它。

博物馆里的问题

有些古书已经这么陈旧，在翻的时候无论怎样小心，书页都要破损，而在博物馆的实际工作里，又常常有翻阅它们的必要。这样的书页应当怎样去翻它呢？

在这种情况下，只有用电来解决问题，就是使书卷充电。书里相邻各页得到同性的电荷以后，就会彼此排斥，因而毫不损伤地一页页分离开来。这样分离开的书页，无论是用手去翻它，或是用结实的纸去裱它，就都比较容易。

电线上的飞鸟

大家都知道，如果人触到通有电流的电车的电线上或者高压电线上，那该是多么的危险。不但人触着它要死，就是大的动物触着它也会死。我们常常听到牛和马因触到断下来的电线而被电打死的事情。

那末鸟为什么却能够平安无事地停在电线上呢？这种事情常常可以在城市里看到（图 101）。

为了懂得强电流不会伤害鸟类的原因，应该注意这样一件事：停在电线上的鸟的身体，好象是电路的一个分路，它的电阻比起另一个分路（鸟的两脚之间的那部分很短的电线）来要大得多。因此在这个分路（鸟的身体）里的电流就非常小，小到对鸟没有危害。可是停在电线上的鸟，如果翅膀、尾部或嘴触到电线杆——一般说不管用什么方式同地连接，那就马上会有电流通过它的身体流入地里，使它触电身死了。这种情形也常常可以看到。

鸟类有一种习惯，当它们停在高压电线杆的横臂上的时候，常常在有电流的电线上磨嘴。因为横臂没有绝缘，所以停在上面的鸟是和地面相接的。这样，鸟一触到有电流的电线，就不可避免地要触电身死了。

这类事情发生得非常多。因此，譬如说在德国，甚至已经采取了特别的措施来防止鸟类的死亡。为了这个目的，他们在高压电线的横臂上装了绝缘的架子，使鸟类不但可以停在上面，并且让它们可以安全地在电线上磨嘴（图 102）。也有的在危险的地方装着特别的装置，使鸟类碰不到它。

现在的高压电线网每年都有很大的发展，所以为了林业和农业的利益，也要保护飞禽，免得它们被电流杀死。

在闪电光下

在大雷雨的晚上，在电光的短促的一闪中，你也许看到过街道上一种别致的景致吧！设想你在一个古老的城市的大街上忽然遇到一场大雷雨。你在电光的一闪下，一定看到：刚才还是十分活跃的道路，在这一霎那间却好象是“冻结”了。马停留在跑步的姿势里，腿都悬空了；车同样也停着不动，车轮上的每一根辐条都可以看得清清楚楚……

这种好象静止的现象，原因是在闪电的持续时间非常短促。原来闪电也同所有的电火花一样，它的一闪的时间短到不能用普通的方法来测量。可是利用间接的方法却可以查出，每次闪电持续的时间常常只有千分之一秒。在这样短的时间间隔里，物体的位置的移动是不容易被人眼察觉的。所以熙熙攘攘的道路，在闪电光下似乎变得完全不动，那是一点也不奇怪的：要知道我们在闪电光下能够看到物体的时间不到千分之一秒啊！在这样短的时间里，即使是迅速奔驰着的汽车，它的车轮上的每一根辐条也只能移动几万分之一毫米。这样的运动在人眼里当然跟静止没有分别。又因为印象留在视网膜上的时间要比闪电的持续时间长得多，因此这也增强了静止的印象。

闪电值多少钱？

在从前人们把闪电当做神的时候，提出这样的问题会被认做是亵渎神的行为的。但是在科学发达的今天，电能已经变成了一种商品，它同一切别的商品一样，可以计量和估价；这时候提出闪电值多少钱的问题，当然不会被认为是毫无意义的。这个计算题的内容包括：计算出闪电放电的时候所消耗的电能，以及照电灯电的价格算出它值多少钱。

算法是这样：依据最新的资料，闪电放电的电压等于 50,000,000 伏特。电流据估计大约是 200,000 安培（顺便说一说，这数字是根据铁心被电流磁化的程度来确定的；电流是在打雷的时候通过避雷针来到线圈里的）。把伏特数和安培数相乘，就可以得到电功率的瓦特数了。不过这里应该考虑到，在放电时候电压会一直降落到零，所以计算闪电的电能得用平均的电压，换句话说，就是初压的一半。

所以我们的算式是：

也有持续时间比较长的闪电，长到百分之一秒或十分之一秒，还有连续的闪电，几十道闪电在同一径迹上，一个接一个，这样的闪电持续时间更长——可以长到 1.5 秒。

$$\begin{aligned} \text{电功率} &= \frac{50,000,000 \times 200.000}{2} \\ &= 5,000,000,000,000 \text{ 瓦特} \\ &= 5,000,000,000 \text{ 千瓦。} \end{aligned}$$

得出来的数目里有这么多的零，你自然会认为闪电的价钱一定也是一个很大的数目。可是如果用电灯费通知单里所用的计电单位千瓦小时来表出这些电能，那得到的数目就要小得多。闪电的持续时间不会超过千分之一秒，在这一个时间里，消耗掉的电能不过是 $\frac{5,000,000,000,000}{3,600,000}$

1, 400 千瓦小时。一个千瓦小时，我们叫它做一度。如果按照每度电

收 0.20 元这就不难算出闪电的价钱：

$$0.20 \times 1,400 = 280 \text{ (元)}。$$

所得的结果是惊人的：功率比重炮弹大一百多倍的闪电，却只值 280 元。

有趣的是，现代的电工技术已经能够制造闪电了。但是这种人工制造的闪电跟自然界的闪电比较，还是小的。

屋子里的雷雨

你如果想在屋子里做一个小喷泉，那是很容易的。只消拿一根橡皮管，把它的一头浸在水桶里，放在高处；或是把橡皮管套在自来水龙头上。不过管的出口一定要很小，使喷泉的水分裂成许多股细流。为了这个目的，最简单的方法是把一根抽掉了铅心的铅笔杆插在橡皮管的喷水一头上。如果要更方便，还可以在这一头上套一个倒转的漏斗，象图 103 所画的那样。

使喷泉的高度达到半米，并且让水流笔直向上；把用绒布擦过的火漆棒或硬橡胶梳子移近喷泉。你立刻会看到一种相当奇怪的情景：喷泉的下降部分的那几股水，会合成一大股水。这股水落在放在下面的盘底上，会发出相当大的声音，和雷雨所特有的噪声一样。所以物理学家波艾斯关于这一点曾经说过这样一句话：“雷雨里的雨滴会变得那样大，毫无疑问正是这个原因。”你如果把火漆棒移走——喷泉立刻就又变成许多股细流，而那个雷雨所特有的噪声，也变成细流的柔和声了。

在不知道内情的人的面前，你可以象魔术师使用“魔棒”那样，来使用这根火漆棒。

火漆棒对于喷泉的这种意外作用，可以这样来解释：原来水滴会因感应而生电，面向火漆棒那一部分水滴会因感应而生阳电，相反方面的那些水滴会生阴电。这样一来，水滴里电荷不同的部分靠近在一起，它们要互相吸引，就使水滴合并起来了。

电对水流的作用，你还可以用更简单的方法看到：你如果把一个刚梳过头发的硬橡胶梳子拿到自来水的一股细流附近，这时候水流会变得很密实，并且会明显地向梳子的方向弯过去，形成急剧的偏向(图 104)。解释这种现象比解释前一种要复杂些：它同在电荷作用下的表面张力的改变有关。

顺便让我说明一下，传动皮带在皮带盘上转动的时候会起电，也可以用摩擦容易生电来解释。这样产生的电火花在某些生产部门里很有引起火灾的危险。避免的方法是在传动皮带上镀银：因为有了薄薄一层银以后，传动皮带就成了导体，于是电荷也不能在上面积蓄起来了。

第九章 光的反射和折射·视觉

五像照片

摄影术里有一种方法，可以在一张照片上拍摄出一个人的几种不同的面相。在用这种摄影术拍摄成的图 105 里可以看到五种姿势。这种照片比普通照片好的地方，毫无疑问是它能把照片里的人的特点表现得更加完全。我们知道，摄影师最关心的是怎样使照片里的人的面相能最好地把特点表现出来。这里既然一次可以得到几种面相，那末要从里面挑出一种最能表现特点的来，当然可能性就更大些。

这样的照片是怎样拍的呢？当然，一定得靠镜子来帮忙。照像的人背朝着照像机 A 坐着，面朝着两面直立的平面镜 CC (图 106)。两面镜子所成的角度是 360 度的五分之一，也就是 72 度。这样的两面镜子应该可以反射出四个人像，它们各用一种姿势向着/照像机。这些像加上照像机所摄的实物像，就成了一张五像照片。所用的平面镜应该没有框子，以免镜子给照进在像片上。为了在镜子里不映出照像机，得在照像机前面设置两张幕 BB，幕的中间开个小缝，放置镜头。

照出的像的数目要看两面镜子所成的角度。角度越小，照出的像的数目越多。在角度等于 $\frac{360^\circ}{4} = 90^\circ$ 的时候可以得到 4 个像，在角度等于 $\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$ 的时候可以得到 6 个像，在角度等于 $\frac{360^\circ}{8} = 45^\circ$ 的时候可以得 8 个像……不过反射的次数越多，像就越暗淡，所以普通都限于拍摄五个像。

日光发动机和日光加热器

有一种极引人的想法，利用日光能来烧热蒸汽机的锅炉。让我们先来做一不太复杂的计算。地球上每一平方厘米的表面，在大气界限以外受到太阳光线的直射，每分钟接受到的日光能，是能精确地测量出来的。这个数量显然是不变的，所以把它叫做“太阳常数”。太阳常数的数值，就整数来说，是每分钟每平方厘米 2 小卡。太阳经常不断地给地球送来的这份热量，并不能完全到达地球表面：大约有半个小卡要被大气吸收掉。直晒在日光下的地球表面，每平方厘米每分钟里接受的热量，可以算它 1.4 小卡的热量。改用平方米来说，就是每分钟 14,000 小卡，或每分钟 14 大卡，也就是每秒钟大约四分之一大卡。我们知道，一大卡的热完全变成机械工作的时候，可以产生 427 公斤米的功。因此，竖直地射在一平方米地面上的日光，大约可以供给

我们每秒 100 公斤米或略大于 $1\frac{1}{3}$ 马力的能。

要太阳的辐射能完成这么多的功，必须在最有利的条件下——阳光得竖直地射在地面上，并且得百分之百变成功。可是目前已经实现了的那些直接利用日光能做动力的尝试，离这种理想的条件还很远。它们的效率都不超过 5—6%。只是在最近才有几种最有效的日光发动机，效率

达到了 15%。

利用太阳的辐射能来做机械工作比较难，但是利用它来产生热却比较容易。如太阳能热水器，是目前使用最普遍和成效最好的一种太阳能装置，它可以为家庭、工厂或浴室、旅馆等公共场所提供洗澡、洗衣、炊事等用途的热水，水温在夏季一般能达到摄氏 50—60 度。这种装置构造简单，成本不高，在北纬 45 度到南纬 45 度之间的城乡地区最适用，因为这个地区里每年大约有 2000 小时以上的日照时间。现在全世界至少有几百万台太阳能热水器在工作。

还有利用太阳能来蒸煮食物的太阳灶，利用太阳能来干燥农副产品的太阳能干燥器，在广大农村地区、特别在燃料缺乏的地区，也很有发展前途。

在有些干旱的沿海或海岛地区和一些内陆咸水地区，还利用太阳能蒸馏器来制取淡水。

另外，在某些现代化的建筑设计中，正在考虑利用太阳能供建筑采暖或空气调节。

隐身帽

从远古时代流传下来的故事里，有一个关于隐身帽的故事，说有一顶帽子，谁戴了它，别人就都看不见他。普希金在《鲁丝兰和留德米拉》里曾经生动地叙述了这个古代的传说，并且把隐身帽的奇妙的性能有趣地描写了一番。

于是留德米拉想了起来，
这时候她的心忐忑不安，
她试带了赤尔诺魔的帽子……
把帽子转过去转过来，
她把帽子压在眉毛上，正着戴，歪着戴，
又把它颠倒过来戴。
看啊！真是千古奇事！
镜子里的留德米拉不见了；
把帽子倒回来，
从前的留德米拉又出现了；
再倒着戴——又不见了；
取下来——她又在镜子里了！
“好极了！魔法师！我的天哪！
从今以后，我在这里不再有危险了……”

俘虏留德米拉的唯一护身术，就是她有隐身的能力。在可靠的隐身帽的掩护下，她避开了卫兵的监视。这个看不见的女俘虏是不是在，卫兵们只能根据她的动作来推断。

随时随地可以看到
她的飘忽无定的踪迹：
有时候，金黄色的果实

在喧哗着的枝头上不见了，
有时候，一滴滴的泉水
落在揉皱了的草地上。
这时候城堡里的人就知道
大概是这位公主在进饮食了……
夜幕还只刚刚揭开，
留德米拉就到瀑布里
去洗冷水澡。
有一天早晨，
卡尔本人就曾在宫里望见：
在看不见的手下面，
飞溅着瀑布的浪花。

古代人的动人的梦想，有许多早已变成现实了；不少神话里的魔术已经变成了科学上的财富。穿过高山，捕集闪电，坐着飞行毡飞翔……

那末象隐身帽这种东西难道就不能发明吗？换句话说，我们就找不到方法使别人看不到自己吗？现在就让我们来谈一谈这个问题。

隐身人

在《隐身人》这本小说里，英国作家威尔斯竭力使自己的读者相信隐身是完全能实现的。小说里的主人公（作者把他描写成了一位“世界上从来没有过的天才物理学家”）发明了一种方法，可以使人的身体变得看不见。下面是他对一位熟悉的医师所说的关于他的发明的根据。

“我们能够看见一件东西，是由于这件东西能对光线起作用。你知道，物体或者是吸收光线，或者是反射光线，折射光线。如果物体既不吸收光线，也不反射光线或是折射光线，那它就根本不能被看到。例如，你看得见那个不透明的红箱子，就因为红色的涂料能够吸收一部分光线，把其余的光线反射出去。假如那个箱子一点光线也不吸收，而是把全部光线都反射出去，那它在我们眼里就会是一个耀目的白箱子，象银制的一样。能闪烁发光的箱子只能吸收很少的光线，它一般的表面上反射的光线也不多，只是在箱子上的某些地方，在箱棱上反射着和折射着光线，这样就使我们清楚地看到它的闪烁着反射光的外表——有点象发光的骨架。玻璃箱子发光比较少，在我们眼里它不象闪烁着光的箱子那样清楚，这是因为玻璃上反射的光线和折射的光线比较少。如果把一块普通白玻璃放在水里，特别是如果把它放在某种比水密度更大的液体里，那它就几乎会完全看不见，因为透过水射到玻璃上的光线，受到折射和反射的程度非常小。玻璃已经变得跟飘在空气里的一股二氧化碳气或氢气一样，看不见了。”

“是的，”坎普（医师）说，“这一切都极简单，在今天每一个学生都知道。”

“可是还有一件事也是每一个学生都知道的。如果把一块玻璃捣碎成粉，在空气里它就变得十分容易看见了——它变成了不透明的白色粉

末。为什么会这样呢？因为把玻璃捣碎，就是增加它的表面也就是使它所反射和折射的光线增多。玻璃片只有两个面，而玻璃粉末的每一颗粒都能反射和折射通过它的光线，所以能够透过它的光线就非常少。可是如果把捣碎了的白玻璃放在水里，它马上就会隐去。捣碎了的玻璃和水有几乎相同的折射率，这就使光线从水进入玻璃或从玻璃进入水的时候，发生极少的折射和反射。

“把玻璃放在任何一种折射率同它差不多的液体里，你就不能看到它：凡是透明的物体，只要把它放在折射率同它相同的介质里，就会变得看不见。懂得这一点以后，只要略微想一想就会相信，我们也能使玻璃在空气里变得看不见：设法把玻璃的折射率做得跟空气的折射率相同；因为这时候光从玻璃透到空气里，不再会被反射，更不会被折射。”

“对，对，”坎普说，“但是要知道，人并不是玻璃啊。”

“不，人比玻璃更要透明。”

“胡说！”

“自然科学家也是这样说的！难道你只过了十年，就完全忘记了物理学吗？譬如纸是透明的纤维制成的，它所以会发白而不能透光，正同玻璃粉会发白而不能透光是同样的道理。但是如果你在白纸上涂上油，让它来填满纤维之间的空隙，使纸只能用表面来折射和反射光，那末这张纸就会变得同玻璃一样透明了。不但纸是这样，布的纤维，毛织物的纤维，木材的纤维，我们的骨骼、肌肉、毛发、指甲和神经都是这样！总之，人身上的一切，除了血里的血红素和头发里的黑色素以外，都是透明无色的组织组成的。所以要使我们彼此看不见是不很费事的！”

有一件事也可以做这种见解的证据，就是身上没有毛、组织里缺乏色素的生着白化病的动物，是相当透明的。1934年夏天，有一位动物学家在儿童村里找到一只缺乏色素的白蛙，曾经这样描写过它：“皮很薄，肌肉组织能透光；内部器官和骨骼等都能看到……透过腹壁能够非常清楚地看到这种缺乏色素的蛙的心的跳动和肠的蠕动。”

威尔斯小说里的主人公发明了一种方法，能把人体里的所有组织，甚至身体里的色素都变得透明。他成功地把这个发明应用在自己身上。试验获得了辉煌的成就——发明家本人完全变成了一个隐身人。

这个隐身人的以后情形，我们现在就来讲一讲。

隐身人的威力

小说《隐身人》的作者非常聪明而且彻底地证明了，一个人变得透明不能被人看见以后，他就因此取得了几乎是无限的威力。他能够进入任何一间屋子，毫无顾虑地拿走任何一件东西。人们看不见他，所以也捉不到他。由于自己的不能被人看见，他可以跟整队的武装军队斗争而得到胜利。隐身人可以用难以躲避的惩罚来威胁所有不能隐身的人，使全城的居民都服从他的命令。他本人不能被捉到不能被伤害，而他却有完全可能去伤害所有别的人。这些人无论怎样设法自卫，迟早总要被这个隐身的敌人追赶上而受到迫害。这种优越的地位，就使这本英国小说里的主人公可以向本城里受他威胁的人发出这样一道命令：

本城从今天起就不在女王的管辖下了。请你们告诉你们的团长、警察和所有的人：本城从此必须服从我的统治！今天是新世纪——隐身人世纪的第一年，第一天！我就是隐身人一世。一开始，我的统治是宽大的。在第一天，我只判一个人死刑，给大家做榜样。被判死刑的人名字叫坎普。今天就是他的死期。尽管他闭门不出尽力躲藏起来，尽管他用卫兵保护或是穿上盔甲，可是死，不可见的死，还是会降临到他身上的！虽然他采取了预防的措施，但是我的人民不会不知道，死神一定会降临到他身上的！我的臣民们，千万别帮助他，以免同归于尽。

开始的时候，隐身人是胜利的。后来，受威胁的居民作了极大的努力，才找到了跟这个梦想做皇帝的隐身敌人周旋的方法。

透明的标本

这本幻想小说所根据的物理学推理是不是可靠呢？完全可靠。任何透明的物体，放在透明的介质里，只要它们的折射率相差小于0.05，这个透明物体就会变得看不见。在《隐身人》这本小说写成以后十年，人们也真做成了一部分身体的透明标本，甚至整个死动物的透明标本。这些标本现在可以在许多博物馆里看到。

透明标本的制法，简单地说，是先使标本经过一定的加工手续——漂白和洗净，然后再把它浸在水杨酸甲酯里（这是一种有强烈析射作用的无色液体）。最后把用这种方法制得的老鼠、鱼等标本，浸在装满同样液体的容器里。

这里当然不必把标本做得完全透明，因为在完全透明的情况下，这些标本就会完全看不见，因而对于解剖没有用处。但是如果愿意，也可以把它们做得完全透明。

当然，从这里到威尔斯理想的实现——把活人做得透明到完全看不见——还距离很远。因为首先得找到方法，把活人的身体浸在有透明作用的液体里，而又能够不伤害他的组织机能。第二，制成的标本还只是透明的，而不是看不见的。这样的标本只有浸在有同一折射率的液体里，它的组织才看不见。若是让它们留在空气里，那末只有在它们的折射率等于空气的折射率的时候，才能够变得看不见。但是怎样能做到这一点，我们还不知道。

可是就算有这么一天，上面所说的两件事都做到了，也就是英国小说家的幻想变成事实了，那时候我们会不会就有一些隐身战士、隐身队伍，能够意外地出现在敌人后方，用自己那种不可思议的、超自然的行动使整队敌军惊惶失措呢？

小说里的一切，作者预先都作了周密的考虑，所以你会不由自主地信服他所写的事实，认为隐身人真是人类里面最有威力的人。……可是事实并不如此。

原来《隐身人》这本小说的聪明的作者忽视了一个很小的情况。这一点，留在下一节里讲。

隐身人能看见别人吗？

假如威尔斯在下笔以前曾经向自己提出过这个问题，《隐身人》那本不可思议的小说也许就会写不成功……

事实上，就是这一点破坏了对威力强大的隐身人的幻想。隐身人应该是一个瞎子。

为什么小说里的主人公能叫别人看不见他呢？这是因为他的身体各部，包括眼睛在内，都已经变得透明了，因而它们的折射率也等于空气的折射率。

让我们想一下，眼睛的作用是什么。眼睛里的晶状体、玻璃体和其他部分都会这样折射光线，使外面物体的像能够出现在视网膜上。可是如果眼睛和空气的折射率相同，那就不再发生折射现象了：因为从一种介质进入另一种折射率相同的介质，光线不会改变方向，因此也就不能会聚在一点上。光线在完全没有阻碍的情况下进入隐身人的眼睛里，它既不会折射，也不能留在眼睛里（因为隐身人的眼睛里没有色素），因此隐身人不能在自己的视觉里留下任何的像。

由此可知，隐身人是什么也看不见的。他的全部优点显然对他没有一点好处。这个可怕的想做皇帝的人只能流浪在街头，求人家布施；可是人们又没有办法帮助他，因为谁都看不见这个求乞的人。这个最有威力的人实际上只是一个束手无策、陷入惨境的残废人……

因此，按照威尔斯所指的方法去寻找“隐身帽”，是没有用的；即使照这个方法做去一切都顺利，也是不能达到目的的。

保护色

可是也有别的方法可以解决隐身帽的问题，就是把物体涂上适当的颜色，使眼睛看不见它。这个方法在自然界是经常使用的：这就是生物的保护色。自然界里有许多生物就是靠保护色躲避过敌人，在生存竞争当中保存自己的。

战士们所说的“自卫色”，动物学家从达尔文的时候起就把它叫做“保护色”或“掩护色”。这种保护色的例子在动物界可以举出几千个来，简直我们每走一步路都可以遇见它。沙漠里的动物，大多数都有微黄的“沙漠色”，作为它们的特征。那里的狮子、鸟、蜥蜴、蜘蛛、蠕虫等等，总之是沙漠动物群当中一切具有代表性的动物身上，都可以找到这种颜色。相反的，北方雪地上的所有动物，可怕的北极熊也好，不伤人的海燕也好，却都披上了一层白色，它们在雪的背景上简直看不出来。还有生活在树皮上的蝶蛾和毛虫，颜色都非常接近树皮的颜色（如毒蛾等）。

每一个捕捉昆虫的人都知道，由于昆虫有保护色，要找到它们十分困难。你不妨试着去捉一下在你脚边的草地上吱吱叫着的绿色蚱蜢，——在掩护着它的绿色背景里，你简直看不清蚱蜢在哪里。

水生动物也是这样。在褐色藻类里生活的海生动物，都有“保护性”的褐色，使眼睛无法察觉它们。生长在红色海藻区域里的动物，主要的保护色是红色。银色的鱼鳞也同样具有保护性，它保护鱼类即使它们受不到在空中搜寻它们的猛禽的伤害，又使它们受不到在水下威胁它们的

大鱼的袭击：水面不但从上面往下看象面镜子，并且从下面，从水的最深处向上看更象面镜子（“全反射”），而银色的鱼鳞刚同这种发亮的银色背景融合成一片。至于水母和水里的其他透明动物，象蠕虫、虾类、软体动物等，它们的保护色是完全无色和透明，使敌人在那无色透明的自然环境里看不见它们。

自然界在这一方面所用的“妙计”，真比人类的发明才能高明得多。许多动物都能按照周围条件的变动来改变保护色的色调。在雪的背景上不易察觉的银鼠如果不随着雪的融化而改变自己毛皮的颜色，那它就会失去保护色的好处。因此在春天，这种白色小动物会换上一身红褐色的新毛皮，使自己的颜色跟那新从雪里裸露出来的土壤的颜色打成一片。随着冬季的来临，它们又穿上了雪白的冬衣，重新变成白色。

自卫色

人类从自然界那里学会了这种有用的艺术，使自己的身体同周围的背景相融合，以免被敌人发现。从前曾经点缀过战场的那些杂色斑烂的军装，现在已经变成过去了：代替它们的是具有保护作用的常见的单色军装。现代兵舰的灰色的钢甲也是一种自卫色；它使兵舰在海洋的背景上很难被分辨出来。

有一种所谓“战术的伪装”，也同这自卫色有关。防御工事、大炮、坦克、兵舰等都要伪装起来，或者用人造雾掩蔽起来，来迷惑敌人的视线。兵营要用特殊的网来隐蔽，网眼里还要编上一簇簇的草，战士也要穿上染成草绿色的衣服。

现代的军用飞机也广泛地使用着自卫色和伪装。

涂着褐色、暗绿色和紫色（使自己的颜色同地面的颜色相配合）的飞机同地面上的背景，是很难被飞在高处的飞机分清的。

飞机的底部，为了迷惑地面上的观察者的视线，得漆成跟天空一致的浅蓝色、浅玫瑰色和白色。这种颜色象小斑点一样漆在飞机的表面上。在 740 米的高空，这些颜色会同那不显眼的一般背景融合成一体。在 3000 米的高空，有这种伪装的飞机会变得看不见。在黑夜袭击用的轰炸机应当漆成黑色。

在所有的环境里都适用的自卫色，是一种能够反射四周景色的镜面。有这种表面的物体，能够自动地取得四周的颜色，几乎使人不能从远处发现它们的存在。在第一次世界大战的时候，德国人曾经在齐伯林飞艇上使用过这种方法。许多齐伯林飞艇的表面都是发光的铝，能够反射天空和云彩。假使不是它们的发动机的声音，要在它们飞行的时候发现它们，是很困难的。

所以，在民间故事里流传的关于“隐身帽”的幻想，在自然界和军事技术上都已经变成现实了。

人的眼睛在水底下

设想你能在水里潜伏无论多久，同时还能睁开眼睛。请问这时候你在那里能看见东西吗？

看来好象只要水是透明的，在水里看东西就应该和在空气里一样清楚。可是，我们可以回想一下上面所说的隐身人，他所以看不见东西，是因为他眼睛的折射率和空气的折射率相同。我们在水里的时候所有的条件，同威尔斯的隐身人在空气里的条件是接近的。看一下数字就更清楚了。水的折射率是 1.34，而人眼里各种透明物质的折射率是：

角膜和玻璃体.....	1.34
晶状体.....	1.43
水状液.....	1.34

可以看出，晶状体的折射率只比水大十分之一，而我们眼睛的其他部分的折射率都和水相等。所以在水里，光线在人的眼睛里所形成的焦点是在视网膜的后面很远；因而在视网膜上所显现的物像就一定很模糊，使人很难看清要看的東西。只有非常近视的人才能在水底下比较正常地看到东西。

如果你希望想象一下在水底下看到的東西是什么样子的，那你可以戴上一付度数很大的近视眼镜（双凹透镜）。这时候，被折射到眼睛里来的光线，在视网膜的后面很远的地方形成焦点，结果你看周围就会出现一片模糊。

那末人能不能靠折光很强的眼镜的帮助，在水底下看到东西呢？

眼镜上所用的普通玻璃，在这里不大适用：普通玻璃的折射率是 1.5，也就是只比水的折射率（1.34）大一些；这样的眼镜在水里的折射光线的能力非常弱。一定要使用折光能力极强的特种玻璃（折射率差不多等于 2 的所谓铅玻璃）。带着这样的眼镜，我们就能大致清楚地在水里看到东西（关于潜水用的特制眼镜，请看下节）。

现在可以明白，鱼的晶状体为什么会特别的凸出了。鱼有球形的晶状体（图 109），它的折射率在我们所知道的一切动物的眼睛当中是最大的。不然的话，这些生活在折光能力很强的透明环境里的鱼类，就差不多等于没有眼睛。

潜水员是怎样看东西的？

有些读者一定会问，如果我们的眼睛在水里几乎不能折射光线，那末穿着潜水服工作的潜水员又是怎样在水底下看东西的呢？要知道潜水员所戴的面具常常是装着平玻璃，而不是装着凸玻璃的。还有，儒勒·凡尔纳的“鹦鹉贝”号里的几位乘客们，能不能透过潜水艇的窗子观赏一下水下世界的风景呢？

放在我们面前的是个新问题，但是也并不难回答。要回答这问题，先要注意：我们没有穿着潜水服到水底下的时候，水是直接同我们眼睛接触的；戴了潜水面具（或者坐在“鹦鹉贝”号的船舱里），眼睛和水之间就隔了一层空气（还有玻璃）。这就在本质上改变了整个情况。从水里来的透过玻璃的光线，先要遇到空气，通过空气以后才进入眼睛。从水里用任何角度射到一块平玻璃上的光线，按照光学原理，在走出玻璃的时候并不改变方向。可是以后从空气进入眼睛的时候，光线当然又会受到折射。在这种条件下，眼睛所起的作用，同在陆地上完全一样。要解答这个使我们觉得迷惑的问题，关键就在这里。我们可以十分清楚

地看见养鱼缸里的游鱼，就是这一点的极好的说明。

透镜在水底下

把双凸透镜（放大镜）浸在水里，然后隔着它看水里的物体，这个简单的实验你做过没有？在做的时候你一定会吃惊：放大镜在水里几乎不起放大作用了！你也可以把一块“缩小”镜（双凹透镜）放在水里，这时候它好象也几乎失掉了缩小的能力。如果你用来做实验的不是水，而是一种折射率比玻璃大的液体，那末双凸透镜反而会缩小物体，双凹透镜反而会放大物体。

可是如果你回想一下光线折射的原理，那你就不会因这些现象而吃惊了。双凸透镜在空气里能够放大，是因为玻璃的折射率比周围空气的折射率大。然而玻璃和水的折射率相差不多：所以如果你把玻璃透镜放在水里，光线从水里进入玻璃的时候，就不会偏折得很利害。由于这个缘故，放大透镜到了水里，它的放大能力就要比它在空气里的时候小得多，而缩小透镜的缩小能力同样要小得多。

有一些液体，折射率比玻璃大，所以“放大”镜在这种液体里会缩小物体，“缩小”镜会放大物体。空心透镜（说得正确些就是空气透镜）在水里也起着同样的作用：凹的会放大，凸的会缩小。潜水员用的眼镜正是这种空心透镜（图 110）。

没有经验的游泳者

没有经验的游泳者常常由于只是忘记了光线折射原理所引起的一种奇异的后果，而遭到很大的危险：他们不懂得，折射会把一切浸在水里的物体提得好象比它真正的位置高。池塘、河流以及每一个蓄水池的底部，在人的眼睛看来都差不多比它的真正深度浅了三分之一。人们如果把这种假象当做真象的话，往往就会陷入危险。关于这一点，儿童和一切身材不高的人特别应当知道，因为他们把水的深度估计错了，就更有发生生命危的可能。

原因就在于光线会折射。这种底部看来似乎是升高了的现象，同一半浸在水里的茶匙看上去好象是折断了的现象（图 111），可以用同一个光学定律来解释。

你可以就在自己的桌子上检验这种现象。

让同学们这样围着桌子坐下，使他们看不见放在他们面前的一个盆子的底。在盆底上放一个钱币，这个钱币因为有盆壁挡着，大家当然也不能看到（图 112）。现在请你的同学们别转动头，定睛看你向盆里注水。这时候就会发生一件出乎意料的事情；你的同学们忽然都看到了钱币！把盆里的水吸掉以后，盆底和钱币重新又下沉了。

图 113 说明这是怎么一回事。盆底上 m 这块地方，在观察者（他的眼睛在水上面的 A 点）看来，位置好象是升高了：光线受到折射以后，从水里进入空气的光线会象图上所指的路线进入眼睛，而眼睛却在这些线的延长部分上，也就是在 m 的上面看到这部分的盆底。光线的进路越斜， m 的位置就越高。这就是为什么我们从小船上看到平坦的池底的时候，

常常会觉得直接在我们下面的那一部分池底最深，而四周就越远越浅。

所以池底在我们看来似乎是凹形的。反过来，我们如果能够从池底来看跨在池面上的桥，那我们就会以为它是凸形的（象图 114 那样；至于摄成这张照片的方法，我们以后再讲）。在这里，光线是从折射率比较小的介质（空气）走进折射率比较大的介质（水），所以得到的效果就和光线从水进入空气的时候相反。由于同样的原因，站在养鱼缸前面的一排人，在鱼看来也应当不是笔直的一排，而是成弧形的，这个弧形的凸处向着鱼。至于鱼到底是怎样看东西的，或者说得更准确一些，鱼如果有人的眼睛，它们应当怎样看东西，这我们在后面再谈。

看不见的别针

把一个别针插在一块平的圆形软木上，然后把别针向下让软木浮在水盆里。假定这块软木不太大，而别针又好象有足够长，使软木不能遮住你的视线（图 115），可是你无论怎样斜着头看，总不能看到别针。

为什么从别针上来的光线不能到达你的眼睛里呢？这是因为它们发生了物理学上所谓“全反射”的作用。

让我们来看这种现象是怎样形成的。

在图 116 里，我们可以看出光线从水进入空气（总之是从折射率比较大的介质进入折射率比较小的介质）的路线，以及跟这相反的路线。在光线从空气进入水的时候，它们会靠近那条法线；举例来说，依着跟法线成角度 θ 的路线射入水里的光线，射进水里以后，就要依着比 θ 角小的角度 θ' 的方向前进（图 116，不过现在箭头所指的方向应该颠倒一下）。

可是在射来的光线掠过水面，几乎是跟法线成直角的方向射在水面上的时候，又该是怎样呢？它射入水里的路线跟法线所成的角度一定比直角小，是等于 48.5° 。射入水里的光线是不能依着跟法线成大于 48.5° 角的方向前进的。这个角对水来说就是临界角。你们以后如果想明白折射原理的许多出乎意料而又非常有趣的后果，就必须先把这个简单关系弄清楚。

现在我们已经知道，光线在一切可能的角度里射入水里的时候，到了水面以下都要挤在一个相当窄的圆锥体里，这个圆锥体的顶角是 $48.5 + 48.5 = 97^\circ$ 。现在我们来观察光线取相反方向——从水进入空气——的时候，进路是怎样的（图 117）。按照光学定律，它们的路线跟上面说的完全相同。包含在上面说的 97° 的圆锥体里的一切光线，在进入空气的时候，就要沿着水面以上整个 180° 空间，依各种不同的角度散开。

那末，那些落在上面说的圆锥体以外的水底下的光线，都到哪里去了呢？原来它们都走不出水面，水面就象镜子一样，把它们全都反射回去了。一般说来，任何一条水底下的光线，如果依着比临界角（也就是 48.5° ）大的角和水面相遇，都不会被折射而要被反射。它们要象物理学家所说的那样“全反射”。

假如鱼类能够研究物理学的话，光学里对它们说来最重要的一章应该是“全反射”，因为这种现象在它们的水底下的视觉里起着重要的作用。

许多种鱼都有银白的颜色，这极可能跟水底下视觉的特点有关。按照动物学家的意见，这样的颜色就是鱼类适应盖在它们上面的水面颜色的结果：前面已经说过，在从下往上看的时候，水面由于“全反射”，很象一面镜子。在这样的背景前面，只有银白色的鱼才不容易被捕捉它们的水里的敌人发现。从水底下看世界

许多人都想不到，如果我们从水底下来看世界，世界会是怎样不平凡：它在观察者的眼里会变得差不多不能被认出来了。

设想你是在水底下，抬起头在看水面上的世界。那些在你头顶上浮着的云是一点也不会改变形状的：因为竖直的光线是不会折射的。可是所有其他物体，只要它们射出的光线成锐角地和水面相遇，它们的形象就会被歪曲：它们好象位置越低的被压缩得越紧——光线和水面相遇所成的角度越小，挤得越利害。这也是可以理解的：水面上所见的世界既然全部都应该容纳在那个狭小的水底下的圆锥体里；一条 180° 的弧既然应该缩短到差不多一半，弯成一条 97° 的弧，那末形象也就自然要被歪曲了。从物体射出的光线如果用 10° 左右的角和水面相遇，物体在水里的像会被压缩得几乎认不出来了。可是最使你吃惊的是水面本身的形状：从水底下往上看的时候，它们完全不是平的，而是一个圆锥形！在你看起来，你是站在一个大漏斗的底部，而漏斗的壁是用比直角稍微大一些的角度（ 97° ）彼此倾斜着的。这个圆锥体的上部边缘围着由红、黄、绿、蓝、紫等颜色组成的彩色圈。为什么会这样呢？白色的阳光是由各种颜色光组成的，每一种颜色光都有自己的折射率，因此也就有自己的“临界角”。就是因为这个缘故，从水底下往上观察的时候，物体也好象是围着虹彩的光圈了。

那末在这个包含着整个水面上世界的圆锥体的边缘以外，还可以看到些什么呢？那里展开着一片发光的水面，它象镜子一样，会反映水底下的各种物体。

对水底下的观察者说来，形状最特别的是部分浸在水里部分露在水面上的物体。让我们在河里插一根量水深浅的标杆（图 120）。这时候，眼睛在水底下 A 点的观察者会看到些什么呢？我们现在把四周能被看到的—— 360° ——分成几个区，然后对每一个区分别进行研究。在视野 1 的界限里，如果河底的亮度足够的话，他能看到河底。在视野 2 里，他能毫不歪曲地看到标杆的在水面下的部分。在视野 3 里，他大约会看到标杆的同一部分的反映像，也就是标杆的浸在水里部分的倒影（请记住，这里所说的是“全反射”）。再高些，水底下的观察者会看见标杆的在水面上的部分——但是它并不和水底下的部分相连接，而是移到高得多的位置上，跟下面的部分完全脱离开。不用说，观察者一定想不到这个悬在空中的标杆就是原先那段标杆的延长部分！这一部分的标杆显然已经大大地被压缩了，特别是它的下面一部分——那里的几条刻度线显然已经十分接近了。河岸上被洪水淹没了一半的大树，从水底下看的时候，就应该象图 121 里所画的那种样子。

如果在竖标杆的地方立着一个人，那末从水里看出来，这个人的形状会跟图 122 里所画的一样。下水洗澡的人，在鱼的眼睛里就应当是这种样子的！在鱼看来，在浅滩上行走的人是被分成了两截的，变成了两个动物：上一截没有脚，下一截没有头，却有四只脚！当我们从水底下

的观察者（鱼）的旁边走开的时候，我们的上半部分身体就会越下越缩短。等我们走了某些距离以后，几乎全部水面上的身体都会消失——只剩下一个空悬着的人头……

这些不寻常的结论，我们能不能直接用实验来印证一下呢？可惜到了水里以后，即使我们能在水里睁开眼睛，也看不到很多东西。首先，我们在水里只能逗留几秒钟，而在这些时间里水面是来不及恢复平静的；要透过动荡的水面来看清物体，当然是困难的。第二，前面已经讲过，水的折射率跟我们眼睛的透明部分的折射率很少分别，因此在视网膜上出现的物像极不清楚，周围的一切看上去都会模糊不清（223页）。从潜水钟、潜水帽或是从潜水艇的玻璃窗里向外看，也是不能看到所要看的東西的。

在这些情况下，我们已经讲过，观察者虽然是在水底下，却跟“水下观察”的情况不一样：因为在这些情况下，光线在进入我们眼睛以前，先要穿过玻璃再到空气里，因此，它就要受到相反的折射。受到相反的折射以后，光线或是恢复了原来的方向，或是取得了新的方向，但是总不会保留住它在水里所取的方向的。这就是为什么从水下室的玻璃窗向外看，也不能得到“水下观察”的正确概念。

不过我们没有必要亲身去水底下，从水里看水面上的世界。可以利用一种内部装满水的特别照像机来研究“水下观察”。这种照像机不用镜头，代替它的是一种中间钻着小孔的金属片。

很容易明白，假如光孔和感光底片之间的全部空间都装满水，那末外面世界映在底片上的像，就应当跟水底下的观察者所看到的像一样。用这种方法可以得到极有趣的照片，图 114 就是这样得到的照片之一。至于水底下的观察者眼里所看到的水面上的物体，形状所以会那样歪曲（例如直的铁路桥在照片上变成了弧形），我们在讲池的平底为什么看上去好象是凹形的时候，已经讲过了。

还有一种方法可以直接看到水底下的观察者眼里的水面上世界：可以把一面镜子沉在一池平静的水里，适当地使镜子倾斜，就可以在里面看到水面上物体的反映像。

利用这些观察法得到的结果，在一切细节方面，都可以证明上面那些理论上的见解是正确的。

由此可见，水里的眼睛和水外的物体之间的那一层透明的水，能够歪曲水面上世界的整个景象，给了它一种奇异的轮廓。陆栖动物来到水底下以后，一定会不认识它原来住过的那个世界——从透明的水乡深处向上看的时候，这个世界已经大大地改变样子了。

深水里的颜色

美国生物学家毕布曾经非常生动地描写过水底下的颜色的变化。

我们坐着潜水球沉到了水里，这时候我们出乎意料地突然从一个金黄色的世界来到了一个碧绿的世界。在泡沫和浪花离开了窗子以后，我们的四周满是一片绿光。人脸、瓶罐、甚至那黑色的墙壁也都染上了绿色。可是在甲板上人的眼里，我们是沉入了一片幽暗的紺青色的水里。

从一沉到水里起，我们的眼睛就无缘再见到光谱上的暖色——光线（就

是红色和橙色的光线)了。在这里，红色和橙色好象是任何时候都没有存在过。但是不久，黄色也被绿色吸收掉了。那些可爱的暖色光线，虽然只占可见光谱的一小部分，可是当它们在三十多米的深处消失了以后，剩下来的就只有寒冷、黑暗和死亡了。

随着我们往下沉，碧绿的颜色也渐渐消失；到了 60 米的深处，已经很难说水的颜色是绿中带蓝或是蓝中带绿了。

在 180 米的深处，周围的一切好象都染上了一种发光的深蓝色。在这种光线里，照明度已经变得这样小，连读书写字都成了不可能。

在 300 米的深处，我曾经试着决定水的颜色——是黑蓝色，还是深的灰蓝色。奇怪的是蓝色消失了以后，代替它的并不是可见光谱里的次一种颜色——紫色：紫色好象已经被吸收掉了。最后的一些近似蓝色的颜色，终于变成了不可捉摸的灰色。而灰色后来也让位给了黑色。从这一个深度起，太阳完全被战败了，光也永远被驱逐出去了。在人类带着电光来到这里以前的二十万万当中，这里曾经是一片绝对的黑色。

这位探险家在另一段里，对水底下极深处的黑暗又作了这样的描写：

水底下 750 米深处的黑暗，可以说比想象的还要黑，——可是现在（在将近 1000 米的深处），四周显然黑得不能再黑了。看来，水面上的世界里的深夜，只能算是这里的黄昏。对“黑”这个字的使用，我从来不能象在这里那样，具有这样坚定的信心。

我们眼睛里的盲点

假如对你说，在你的视野里有一块地方，虽然它就在你的正前面，你却一点也不能看到它，这你当然是不会相信的。我们的视觉器官有这样大的缺点，而我们却一辈子也觉不出来，这是可能的吗？可是做一个简单的试验，就能使你深信这一点了。

把图 123 放在离你右眼（闭上左眼）大约 20 厘米的地方，用右眼看那图上左方的一叉；慢慢地把这个图移近你的眼睛。这样，在移到一定距离的时候，图上右方那个在两个圆的交叉处的大黑点，就会完全消失！这个点虽然还在可见区域的范围里，你却不能看见它了，而黑点左右两个圆圈你却仍旧看得很清楚！

这个试验是马里奥特在 1668 年首先提出的，不过形式略微有些不同。马里奥特叫两个人彼此相隔两米对面站着，都用一只眼睛看旁边的某一点——这时候他们两人就都会发现自己的对方没有了头。这个试验曾经使路易十四的大臣们非常高兴。

说也奇怪，人们直到十七世纪才知道人眼的视网膜上有个盲点，以前谁也没有想到过有这样一个东西。视网膜上这个盲点的位置，就在视神经已经进入了眼球却还没有分成含有感光细胞的细枝的地方。

我们不能察觉出视野里的这样一个黑点，是由于长时期来我们对它习惯了。我们的想象力会不知不觉地用周围背景上的细节来弥补好这个缺陷。譬如在图 123 里，我们虽然没有看见这个黑点，我们的想象力却

会把那两个圆圈上所缺的部分给补出来，使我们自认为已经在这块地方看见了两圆交切的情形。

如果你是戴眼镜的，你还可以做这样的试验：在眼镜玻璃上贴一小块纸（别贴在正中，而要贴在旁边）。头几天这张纸片是会妨碍你看东西的，可是过了一两个星期，你对于它就会习惯了，甚至会觉察不到它了。有些人眼镜玻璃裂了缝以后，却又不得不戴它，这样的人，也有类似的经验：只在最初一些日子里他感到有裂缝。可见我们觉不出自己眼睛里有盲点，同样是长时间的习惯的结果。何况每一只眼睛的盲点使你看不见的地方又是不同的，所以在两只眼睛同时看的时候，在它们的总的视野里，也没有什么看不见的地方。

你别以为我们视野里的盲点并不大。你如果用一只眼睛看 10 米以外的一所房屋（图 124），那末由于盲点，你不能看到这所房屋的正面很大一部分地方——直径一米多，容得下整个一扇窗。你如果注视天空，也有一块地方看不见，它的面积大约等于 120 轮满月。

月亮在我们眼里有多大？

这里我要顺便谈一谈月亮在人眼里的大小。如果你问一下熟人，月亮在他们眼里有多大，你就会得到各式各样的回答。大多数人都会说，月亮有盘子那么大，可是也有人说，它的大小象一个装果酱的碟子，或者象一个樱桃，一个苹果。还有一位中学生说，月亮在他眼里常常“象一张可以坐十二个人的大圆桌面那么大”。又有一个现代的文艺作家肯定说，在空中有一个“直径一俄尺的月亮”。

同样一个物体，为什么对它的大小有这么多种不同的说法呢？

这是由于人们对距离的估计各有不同，而且这种估计常常是无意识的。把月亮看成象苹果那样大小的人所想象的月亮离自己的距离，一定比把它看成象盘子或圆桌面的人所想象的，要近得多。

可是大多数的人，都认为月亮有盘子那么大。从这里可以得出一个有趣的结论。如果算一算（算法读了下文自然会清楚）应该把一个盘子般大的月亮放在多远的地方，它才会有见到的这种大小，那算出的这个距离不超过 30 米。请看我们在不知不觉中把月亮放在多么近的地方了！

有不少错觉也是由于对距离估计错误而起的。我小的时候，“那时候一切生活上的印象对于我都是新鲜的”，我曾经有过几次视觉上的错误，这些事到现在还记得很清楚。我是生在城市里的人。有一年春天，我到郊外去闲游，那时候我生平第一次看到了一群在草地上放牧着的牛。因为我估计距离不正确，这些牛在我眼里就似乎非常小。这样的小牛在那一次以后我再也没有看到过，当然，也决不会再看到。

天文学家确定天体的视大小，是用我们看到天体所夹的角的大小。这个角叫做“视角”，它是从所看的物体的两个极端引到眼里来的两条

一俄尺等于 0.711 米。

可是成年人有时候也有同样的错觉。格利高罗维奇在《庄稼人》这本小说里写的一段话可以做证明。“附近的景象就好象展现在掌上；树似乎就在桥旁边；房屋、山岗和小桦树林，现在似乎都跟村庄连接在一起。所有这一切——房屋、花园、村庄——现在都象是那种用藓茎当树、用玻璃片当河的小玩意”。

直线形成的(图 125)。我们知道角是用度、分、秒来计算的。提到月面的视大小,我们不说它等于一个苹果或一个盘子,却要说它等于半度;意思就是从月面的两边引到我们眼里来的两条直线,会形成一个半度的角。这种确定视大小的方法才是唯一正确的方法,不会发生误会。

几何学告诉我们,物体离开眼睛的距离如果大到物体直径的 57 倍,这物体在观察者的眼里所形成的视角是一度。例如,如果把一个直径 5 厘米的苹果放在离眼睛 5×57 厘米的地方,它的视角就是一度。如果把这个距离加倍,它的视角就是半度,也就是我们眼里所见的月亮的角度。如果你乐意,你可以说,月亮在你眼里跟苹果一般大,——可是得在这样的条件下,就是苹果必须离你的眼睛 570 厘米(大约 6 米)。在你想把月亮的视大小比做盘子的时候,你必须把盘子放在离你大约 30 米远的地方。大多数人都不愿相信月亮会是这样小;可是请你把一枚一分的硬币放在离你眼睛相当于它的直径 114 倍那么远的地方。这时候,虽然它离开眼睛有两米,可是恰巧能把月亮遮住。

如果有人建议你在纸上画一个圆圈来表示肉眼所见的月亮,那这任务对你说来是不够明确的:因为圆圈可大可小,就看你把它放在离你眼睛多远的地方。可是如果我们提出我们是在平时读书看图的时候所保持的距离上,也就是所谓明视距离上,对于普通的眼睛,这个距离等于 25 厘米,那条件就明确了。

这样,让我们来算一算,印在这本书上的一个圆圈应当有多大,才能和月面的视大小相等。算法很简单:只要用 114 来除明视距离 25 厘米就行了。得出来的是一个很小的数值——比 2 毫米稍微大一些!它的宽度大约和这本书里脚注的字差不多。

月亮和太阳的视大小是相等的,就是说它们的视角都是这样小,这简直很难使人相信!

你也许已经注意到:你的眼睛朝太阳看了以后,视野里很久都会有一个光圈在闪烁。这就是所谓“光的痕迹”,有同太阳一样的视角。可是它们的大小是会变动的:在你看天空的时候,它们同日面一样大;如果你把眼光移到放在面前的一本书上,那这个太阳的“痕迹”在纸上所占的地位,就会是一个直径大约是 2 毫米的圆圈。这清楚地证明了我们的计算是正确的。

天体的视大小

假如我们按照这个比例在纸上画大熊星座,那我们就会得到象图 126 那样的图。把这张图放在明视距离里来看,我们看见的星座就同它在天空中出现的时候我们看到的一样。所以可以说,这就是一张照天然视角的比例所画的大熊星座图。如果你对这个星座——不但是图,而且直接对它本身——有过很深的印象,那末看了这张图以后,你的脑子里就会重新浮起这个印象来。如果你知道了所有星座的各个主星之间的角距(这可以从天文年历和类似的参考书里找出来),你就可以用“天然比例”画出一幅整个的天文图来。画的时候,只要准备一张每格一毫米见方的

方格纸，把纸上每 4.5 毫米当做一度就成了（表示星球的圆圈面积，应当比照亮度来画）。

现在来谈行星。行星的视大小也同恒星一样，小到对肉眼说来只是些光点。这也是可以理解的，因为没有行星（除了在最明亮时期里的金星），在肉眼里的视角会超过一分，也就是说，会超过能使我们分辨出物体大小的临界视角（在比临界视角更小的视角里，每一个物体对我们说来都只能是一个点）。

下面这张表列着各个行星的视角，每一个行星后面有两个数字，第一个数字是这个行星离地球最近时候的视角，第二个是最远时候的视角：

	视角（秒）
水星	13—5
金星	64—10
火星	25—3.5
木星	50—31
土星	20—15
土星的环	48—35

把这些数值照“天然比例”画在纸上是不可能的：甚至视角一分（也就是 60 秒）在明视距离里也只有 0.04 毫米，这个大小肉眼自然是无法分清的。所以我们得按照在放大 100 倍的天文望远镜里所见的行星圆面来画。图 127 就是在这种放大情况下画成的一张行星视大小的图。图下的那条弧线代表在放大 100 倍的天文望远镜里的月面（或日面）的边缘。在这条线上面是水星离地球最近和最远时候的大小。再上去是在各种位相里的金星；它离我们最近的时候是完全看不见的，因为那时候它是用它那没有照到日光的一面朝着我们的。后来渐渐可以看到它的狭窄的月牙般的形状，所有行星的“圆面”没有比这更大的。在以后的位相里，金星要越来越小。在它满轮的时候，它的直径就只有它在月牙形时候的 $1/6$ 。

在金星上面画的是火星。在左方，你可以看到它在离地球最近的时候我们在放大 100 倍的天文望远镜里望见的大小。在这样小的圆面上你想能够看清些什么呢？还得把这个圆圈再放大 10 倍，你才可以得到天文学家在用放大 1000 倍的强大天文望远镜研究火星的时候所得到的印象。可是即使在放得这样大的圆面上，什么东西都挤得很紧，你能够不确切地认出那些大家都知道的“运河”之类的细节，或者觉察出那似乎是跟生长在火星的“海”底的植物有关的轻微的颜色变动吗？怪不得某些观察者提出的证据会同别人指出的不一致，或者某些人认为是清楚地看见了的东西，另一些人却认为不过是光学上的幻觉……

在这个位置上，我们只能在金星成黑点（所谓“金星凌日”）的形式投射在日面上的时候看到它，但是这种情况非常少见。

关于火星和其他行星的最新报导，并不全靠视力来测定。使用各种灵敏的仪表来测量各大行星和它们的卫星的物理条件，都会有十分确切可信的结论。现在空间技术的发展，使人们对于火星的情况，了解得更多了。

庞大的木星和它的那些卫星，在我们这张图里占着显著的位置。它的圆面比其他行星都要大得多（月牙形状的金星除外），而它的四个主要卫星并排排在一条直线上，几乎等于月面直径的一半。这里的木星是离地球最近时候的大小。最后是土星和它的环，以及它的最大的一个卫星（泰坦），它们在离地球最近的时候，也是相当惹人注目的。

读者由此可以明白，每一个可见的物体，如果我们认为它离开我们比较近，看起来就会觉得它小。相反地，如果由于某种原因，我们过大地估计了物体离我们的距离，那末这物体在我们眼里就会相当大。

下一节要讲爱伦坡的一篇很有启发性的描写错觉的故事。这篇故事初看好象不可信，然而却完全不是虚构的。我自己也曾经上过这种错觉的当，饱受了一次虚惊。读者当中一定也有许多人可以从自己的生活里找到类似的情况。

天蛾

爱伦坡写的故事

在纽约霍乱流行得极可怕的那一年，有一位亲戚请我上他的幽静的别墅去住两星期。假如不是每天有可怕的消息从城里传来的话，我们在那里本来可以过得很好的。可是简直没有一天不收到某个相识的人病死的消息。到末了几天，我们总是提心吊胆地等着报纸。甚至从南方吹来的风，我们看来也好象充满了死亡的气息。我整天觉得心惊胆战。幸而那家主人还比较镇静，总竭力安慰着我们。

有一天，天气很热，太阳快要落山了，我手里拿着一本书，坐在一个打开着的窗子前面。窗外可以看见河那面远处的小山。我的心早已不在书上，却飞到那充斥着凄凉和绝望的城里去了。我抬起头，偶然看了一眼窗外那个小山的裸露的山坡，突然看到一个奇怪的东西：一个丑恶的怪物很快地从小山顶上爬下来，消失在山脚下的森林里。在刚一看见这个怪物的时候，我还很怀疑我的理智，或者至少我的眼睛是不是很正常。只是过了几分钟以后，我才确信这并不是我的幻觉。这个怪物我看得极清楚。在它从山上往下走的全部时间里，我还仔细地观察了它。可是如果我把它描写出来，读者们也许不会轻易地相信的。

我曾经用一些大树的直径同这个怪物比较过，以便确定它的大小，我深信它比任何一只战舰都大。我说战舰，是因为这个怪物的形状很象一艘船：看了一艘装有 74 门炮的战舰就可以十分清楚地得到关于这个怪物的轮廓的概念。怪物的嘴巴长在一根吸管的尽头，吸管有六七十英尺长，粗细差不多同普通的大象身体一样。在吸管的根上有一丛丛很密的茸毛，从毛里突出两根发亮的长牙，向下面和旁边弯曲着，象野猪一样，只是它的体积硕大无比。在吸管两旁，还生着两只笔直的大角，长大约三四十英尺，看来好象是透明的，在日光下闪闪地发着亮光。这怪物的躯干好象一个顶端朝地的楔，上面长着两对翅膀——每个翅膀大约长 300 英尺，一对叠在另一对上面。翅膀上密集地镶嵌着一些金属片，每一片的直径大约是 10-20 英尺。可是这个可怕的怪物的主要特点，还是它那几乎遮住整个胸部的下垂的头，它的耀眼的白色，在黑色的胸部衬托下，

显得非常清楚，好象画出来的一样。

当我正怀着畏惧的心情注视着这个怪物，特别是注视着它胸部的那个可怖的外形的时候，它突然张开了口，大吼了一声……我的神经不能再支持了，而当怪物消失在山脚下的森林里的时侯，我也昏倒在地上……

在我苏醒以后，第一件事就是把所看到的说给我的朋友听。他听完了我的话，先是哈哈大笑，然后神色变得十分严肃，似乎一点也不疑心那是我精神恍惚的结果。

在这时候，我又看到了那个怪物，就高叫着指给我的朋友看。他看了一会，可是肯定说没有看到什么，虽然我在怪物下山的时候详细地对他说明了它的位置。

我用双手遮着脸。在把手拿开以后，怪物已经不见了。

主人开始问我那怪物的外形。在我详尽地告诉了他一切以后，他透了一口气，好象从某种难以忍受的重压下解放了出来似的。他走到书橱旁边，拿了一本博物教科书。他叫我换一个地方，因为靠近窗看书里的小字比较省力。他在椅子上坐定以后，就打开书对我说道：

“如果你对怪物不描述得那么详细，我也无论如何没法给你解释明白这是什么东西的。现在先让我从这本教科书里给你读一段关于昆虫纲鳞翅目天蛾科里的一种天蛾的描述。你听：

“两对带薄膜的翅膀，翅膀上满盖着有金属光泽的带色的小鳞片；口器是伸长了的下颚形成的，在它们的两旁有长着柔毛的触角的原始体；下面的翅膀同上面的翅膀是用坚固的细毛连在一起的。触须象三棱形的突起。腹部是瘦削的。天蛾的头挂在胸部，它又会发出一种悲哀的鸣声，所以在民间有时候把它看做灾祸的象征。”

读到这里，他合拢了书，靠在窗上，姿势同我在看到“怪物”的时候坐的姿势一样。

“啊！原来就是它！”他叫道，“它正沿着山坡在往上爬，它的样子，我得承认，的确很奇怪。可是它并没有那么大，也不在那么远，象你所想象的。它正沿着缠在我们这窗子上的一条蜘蛛丝往上爬呢。”

为什么显微镜能够放大？

对于这个问题常常可以听到这样的回答，“因为它能象物理学教科书里所说的那样按照一定的方式改变光线的进路。”但是这样的回答只说明了它的远因，还没有说出事实的本质。那末显微镜和望远镜能够放大的基本原因究竟在哪里呢？

它的基本原因，我不是从教科书里知道的，而是当我还是一个小学生的时候，有一次注意到了一种怎样想也想不通的极有趣的现象而偶然理解的。我坐在关着的玻璃窗旁边，眼睛看着小胡同对面的一所房屋的砖墙。突然我恐怖地躲开了。原来我清楚地看见砖墙上有一只好几米宽

现在这种蛾是属于人面蛾属。它是少数能够发声的蛾的一种（它的声音很象鼠叫），又是唯一能够用口器来发声的蛾。它发出的声音相当大，几米以外都能听到。在这里所说的情况里，观察者听到的它的鸣声一定特别大，因为观察者认为这个声源是在极远的地方（参看《趣味物理学》前编第十章“声音的怪事”）。

的人眼在瞪着我……那时候我还没有读过刚才那个爱伦坡的故事，所以没有能够立刻理会到这只大眼睛就是我自己的眼睛在窗玻璃里的反映像，我把这个像看做是在很远的墙上，所以才把它估计得这么大。

猜透了这是怎么一回事以后，我就想能不能根据这种错觉的道理来制造显微镜。后来我试验失败了，我才明白显微镜放大作用的本质并不在于它能使被观察的物体显得尺寸大些，而是在于使我们能够在比较大的视角里看物体，因而，——这是最重要的一点——物体的像在我们眼睛的视网膜上能够占据比较大的地位。

为了明白视角的作用在这里为什么这样重要，我们应该先来说明一下我们眼睛的一个重要特点：每一个物体或者它的一部分，我们如果是在比一分小的视角里看它，那它对正常的眼睛说来，就会聚成一点，使我们既看不清它的形状，也分不清它一共有多少部分。当一个物体离开我们眼睛的距离远到（或者物体本身小到）这样程度，使这个物体的全部或一部在我们眼睛里的视角比一分还小，这时候我们就不能分辨出它的结构上的细节了。原因在于：在这样小的视角里，物体（或物体的任何一部分）在视网膜上的像不能同时接触到许多神经末梢，而只能全部落在一个感觉细胞上。这时候，形状和结构上的细节都消失了——我们看到的只是一点。

显微镜和望远镜的作用是，它们能够改变所观察的物体发出的光线的进路，使我们能够在比较大的视角里看到这个物体。结果，视网膜上的像就扩大到可以接触到更多的神经末梢，而我们也能分辨清楚物体的这些本来看起来是聚成一点的细节了。“显微镜或望远镜放大 100 倍”这句话的意思是，我们通过这种仪器来看物体，视角要比没有它的时候大 100 倍。假如光学仪器不能放大视角，那末虽说我们觉得看到的物体是变大了，其实并没有放大什么。砖墙上的眼睛我觉得是很大的，——但是我不能在这个反映像里看到比镜子里所能见到的更多一些的细节。月亮离地平线近的时候，我们觉得它比起它在半空中要大得多，——但是在这个好象比较大的月面上，我们能够比它在高空的时候分辨清楚更多的、即使只是多一个的黑点吗？

回头说那在爱伦坡的故事《天蛾》里所描写的那种放大的情形，我们相信在这个放大的天蛾的像里，也不能看出任何新的细节来。无论是把这只天蛾的像放到很远的树林里，或是移近到窗框上，我们看它时候的角度都相同，视角并没有改变。视角既然没有改变，那末这个物体的像，无论大得多么使你吃惊，也不能使你从里面看出什么新的细节来。作为一个真正的艺术家，爱伦坡甚至在自己故事的这一点上，也是忠实于自然的。不知道你有没有注意他是怎样描写森林里的“怪物”的。在他所列举的天蛾的那些肢体里，没有一样是我们用肉眼观察天蛾的时候不能看到的新东西。故事有意把天蛾描写了两次。如果把它们拿来比较一下，你就会看出它们之间的区别只是在字句的表达上（直径大约是 10—20 英尺的金属片——有金属光泽的带色的小鳞片；两只笔直的大角——触须；象野猪一样的长牙——长着柔毛的触角；等等），至于肉眼所分辨不出的任何细节，在第一次描写里也没有提到。

如果显微镜的作用只是上面所说的那种放大，那它就只是一种玩具，对于科学毫无用处。可是我们知道，实际的情况并不是这样。显微

镜在人类面前打开了一个新的世界，使我们天然视力的界限向前推进了一大步。

俄罗斯科学家罗蒙诺索夫在《谈玻璃的用处》里写道：

尽管自然界赋予了我们锐利的目光，——
但是它的力量有一个很近的界限。
不知有多少生物由于身体微小，
我们的目力怎么也看它不见！

但是在“现代”，显微镜已经给我们揭露了看不见的极小的生物的构造：

它们用来维持生命力的肢体、关节、
心脏、血管和神经是多么细小！
小蠕虫的构造的复杂，
并不比大海里的巨鲸差多少……
显微镜所揭露的看不见的微粒，
和身体里的细小血管，真是没完没了！

现在我们已经可以明确地理解了：为什么爱伦坡故事里的观察者不能在自己的怪蛾身上看到的“秘密”，在显微镜里却能够看到。把上面所讲的总结一下就知道，因为显微镜并不是简单地使我们看见物体的放大形态，它还能使我们在比较大的视角里看到这物体。由于视角的加大，在我们眼睛的视网膜上就会出现物体的放大像。这像能作用在数目更多的神经末梢上，使我们感官得到的各别视印象的数目加多。说得简单一些，显微镜所放大的不是物体，而是它们在我们眼睛视网膜上的像。

视觉上的错觉

我们常常说到“视错觉”，“听错觉”，但是这个说法是不正确的。感觉器官是不会有错觉的。哲学家康德说得好：“感官不会欺骗我们，并不是因为它们随时在正确地判断，而是因为它们根本不判断。”

那末，在发生所谓“错觉”的时候，到底是什么在欺骗我们呢？当然，是那执行判断的东西——我们各人的脑子。真的，大部分视错觉的发生只是因为：我们不但在看，而且还在不知不觉中进行判断，在无意中把自己引上了迷途。所以这只是判断上的错误，而不是感官上的错误。

早在两千年以前，古罗马诗人卢克莱修就曾经写过：

我们的眼珠也不认识实在的本性。
所以请别把这心灵的过失归之于眼睛。

下面是一个大家都知道的视错觉的例子：图 130 里的 A 看上去似乎比 B 要窄些，虽然它们都在同样大小的正方形里。你所以会把它们看错，是因为你估计 A 的高度的时候，不自觉地各个间隔加了起来。因此，这个高度就好象比同一个图上同它等长的宽度更大些。反过来，由于同

样的不自觉的判断，B 的宽度又好象比高度更大些。同样原因，图 131 的高度也似乎比它的宽度要大些。

服装和错觉

假如把刚才讲过的视错觉，应用到一些一眼不能立刻看完的大图案上，那我们得到的错觉又会和上节里所得到的相反了。谁都知道，矮胖的人如果穿一身有横条纹的服装，看上去他就不但不会瘦些，反而会更胖些。相反地，他如果穿一身有直条纹和褶皱的服装，就会显得瘦些了。

这个现象应该怎样来解释呢？可以这样来解释：当我们看这样的服装的时候，我们是不能一眼把它看完的；我们的眼睛必然会不由自主地跟着条纹走。眼睛里的肌肉一用力，就迫使我们在不知不觉中把物体在条纹方向上看得过大。我们已经习惯于把视野里容纳不下的大物体的概念同眼睛肌肉的用力联系在一起。但是在看小的条纹图案的时候，我们眼睛可以留在原处不动，眼睛的肌肉因而也不会感到疲劳。

哪个更大？

在图 132 里，哪个椭圆形更大些：是下面一个还是上面放在里面的一个？你一定很难不这样想，认为下面一个比上面那个大些。其实两个都是一样大的。只因为上面那个椭圆形的外面还有一个椭圆形围着，结果就造成一种错觉，认为上面那个椭圆形比下面那个要小一些。

还有，整个图形在我们看来不是平面的而是立体的——形状象只桶（这些椭圆形我们都会不由自主地看成是从远处望见的圆，而侧面的两条直线，又会看成是桶壁），这些都加强了我们的错觉。

在图 133 里，a 和 b 两点间的距离好象比 m 和 n 两点间的距离更大些。从同一个顶点引过来的第三条直线更加强了这个错觉。

想象的力量

大多数的视错觉，象已经说过的一样，都是由于我们一面看，一面在不知不觉中进行判断而发生的。生理学家说，“我们不是用眼睛看，而是用脑子看。”你如果熟悉某些幻象，而这些幻象又是你在有意识地把想象力参加到看的过程中以后得到的，那你就会乐于同意上面的说法。

让我们把图 134 仔细看一下。假如你把这张图拿给旁人看，那你就得到三种答案。有的人说这是楼梯，另一些人说这是从墙壁上挖出来的凹入的壁龛，还有些人会从图里看出一条折成手风琴褶壁状的纸条，并且说这纸条是斜放在一块白色方块上。

奇怪的是这三种答案竟都是对的。假如你从不同的方向看这张图，你就可以看到所有这些东西。详细地说，看图的时候，你如果先把视线对准图的左面部分，你就会看到一个楼梯。如果你把目光顺着图从右向左看，你就会看到壁龛。如果你的目光跟着对角线从右下角向左上角斜着看过去，那你就看到一条手风琴褶壁状的纸条。

可是看的时间过分长了，你的注意力就会疲倦；并且你会轮流地看到这三种东西，一会儿第一个，一会儿第二个，一会儿第三个，已经不管你的愿望是怎样的了。

图 135 也有同样的特点。

图 136 里的错觉很有趣，我们会不由自主地觉得 AB 之间的距离比 AC 短。其实它们是相等的。

再谈视错觉

并不是所有的视错觉我们都能够解释明白的。我们常常不能理解究竟是哪一种推理在我们的脑子里不自觉地进行着，使我们产生这种或那种视错觉。图 137 里可以清楚地看出相对着凸出来的两条弧线。对于这一点，是一些疑问也不会有的。可是你只要拿支尺放在这两条想象的弧线上，或者把这张图拿得同眼睛一般高，然后顺着线看，那你就会看出这两条线都是直的。解释这种错觉却不很容易。

让我们多举出几个同类的错觉例子来。图 138 里的直线看上去好象被分成几段不等长的线段，可是量一下你就知道，这几段线都是同样长短的。图 139 和 140 里的平行直线看上去好象是不平行的。图 141 里的圆看上去好象是个椭圆。有趣味的是，如果你把使你产生错觉的图 137，139 和 140 放在电火花的光下看，它们就不能再欺骗你的眼睛了。显然，这些错觉和眼睛的移动有关：在电火花短时间发光的情况下，眼睛是来不及移动的。

这里还有一个有趣的错觉。看了图 142，请你说，哪些短横比较长：是左面那些还是右面那些？左面一组看来似乎更长些，尽管两组线是等长的。这种错觉叫做“烟斗”的错觉。

对于这些有趣的错觉，曾经有过许多解释。可是都很难使人满意，所以我不打算在这里提到它们。可是有一种解释，显然是没有疑问的。它说这些错觉的原因都隐藏在无意识的判断里；人脑常在不知不觉中“卖弄聪明”，结果就会使我们看不到实际的情况。

这是什么？

看了图 143，你未必能立刻猜到里面画的是什麼。你会说“那不过是一些黑白点做成的格子网”。可是你把书竖在桌子上，后退三四步，然后看它，你就会看到一只人眼。你走近些——出现在你面前的又只是个什麼也不表示的格子网……

你当然会想到这是某一位天才的雕刻家想出来的一种巧妙的“把戏”。不，这不过是一种错觉的粗浅的例子，在我们每次看铜版图的时候都会看到。书上和杂志上的图画，看上去常常是连成一片的；可是你如果用一个放大镜来观察它，那在你面前就会出现跟图 143 所画的一样的那种格子网了。这张使我们看不出东西来的图画不是别的，只是一张放大了 10 倍的普通铜版图的一部分。不同的地方只是书籍杂志上的图画

顺便说说，这个图是几何学上著名的卡瓦列里定律的图解（“烟斗”的两部分所占的面积是相等的）。

格子小，你在近距离里看它，它已经就是密密的一片——通常你看书的时候，眼睛离书的距离就能使你得到这种印象。这里的格子大，要得到同样的印象，就得站在比较远的地方。

奇怪的车轮

你曾经透过栅栏间的缝，或者在电影上观察过跑得很快的货车或汽车的轮辐吗？如果观察过的话，那你一定曾经看到过一种怪现象：汽车在飞快地前进，而它的轮子只是在慢慢地转，或者根本不在转。不但这样，有时候这些车轮甚至还是朝着相反的方向转！这种情况在电影上比透过栅栏看更加清楚些。

这种错觉是这样奇怪，不管是谁，第一次看到的时候都会感到莫名其妙。

原因是这样的。你顺着栅栏走，透过栅栏上的缝看车轮旋转的时候，你一定不能连续地看见那些轮辐，而要隔开一定的时间看到它们一次。因为栅栏上的木板每隔一定的时间要隔断你的视线一次。电影片显示给你的车轮的像也是不连续的，而是隔着一定的时间（每秒 24 张画面）的。

这里可能发生三种情况，让我们逐个地来研究。

第一种可能的情况是，在视线被隔断的时间里，车轮来得及转完整数的转数——这整数是多少，是 2 或是 20 都没有关系，只要是整数就行。这时候车轮的那些辐条在画面上的位置同它们在前一张画面上的位置完全相同。在下一个时间间隔里，车轮又转了整数的转数（因为时间间隔的长短和汽车的速度都是不变的），于是轮辐的位置还是同以前一样。我们所看到的轮辐自始至终都在同一种位置上，因此会得出这车轮根本不在转动的结论（图 144，中间一行）。

第二种可能的情况是，车轮在每一个时间间隔里，不但来得及转完整数的转数，并且还转了不大的小半转。看到这种变换着的画面的时候，我们不会想到这里还有整数的转数，而只看见车轮在慢慢地转（每次只转一周的一小部分）。结果我们就觉得汽车虽然走得很快，车轮却转得慢极了。

第三种可能的情况是，在两次摄影的时间间隔里，车轮来不及转完整一转，离一整转还差一小部分（例如它只转了 315° ，象图 144 第三行所画的那样）。这时候，任何一条轮辐看来都好象在朝着相反的方向转了。这种错觉会一直持续下去，直到车轮改变它的旋转速度为止。

在我们这个解释里，还应当做一些补充。在第一种情况里，为了简单起见，我们曾经说到车轮转了整数的转数；可是车轮上的每根辐条都是相同的，所以只要让车轮转完整数个的轮辐间空隙数也就足够了。这一点在另外两种情况里也同样适用。

还可能发生另外一种情况。

如果在轮缘上做上记号，而所有的轮辐都是同一个样子的，那末有时候我们就会看到轮缘在朝着一个方向转，轮辐在朝着另一个方向转！可是如果在轮辐上做上记号，那末这些轮辐可能朝着同记号转的方向相反的方向转，记号好象会从一个轮辐跳到另一个轮辐上去。

如果在电影片上拍摄的是普通场面，这种错觉对于人们认识事物的

真相还很少妨害。可是如果想在银幕上解释某一种机件的作用，那末这个错觉就会产生严重的误解，甚至会把机器工作的概念完全颠倒过来。

仔细的观众在银幕上看到在飞速前进的汽车的轮子好象不动的时候，在数了轮辐的数目以后，就很容易断定车轮每秒钟大约转多少转。电影片通过放映机头的速度，普通都是每秒 24 张画面。如果汽车轮的辐条有十二根，那末这车轮在每秒钟里旋转的转数就等于

$24 \div 12 = 2$ ，或者在 $\frac{1}{2}$ 秒里转一整转。不过这是最少的转数；它可以

是这个数目的整数倍数（两倍，三倍等等）。

如果再把车轮的直径估计出来，就可以算出汽车的前进速度了。例如，如果汽车的轮子的直径是 80 厘米，那末在这里，汽车的速度大约是每小时 18 公里，或 36 公里，或 54 公里等等。

刚才看到的错觉，技术上就利用来计算旋转得很快的轴的转数。让我们把这个方法所根据的原理解释一下。交流电的电灯的光，实际上不是稳定的，而是每隔 $\frac{1}{100}$ 秒要变弱一下，不过在普通的条件下我们是看不出这种光的闪烁的。现在让我们设想，我们是在用这种光照射图 145 里所画的那种转盘。如果这转盘会在 $\frac{1}{100}$ 秒的时间里转 $\frac{1}{4}$ 周，那就会发生一种意外的情况：我们看不到在普通情况下所看见的均匀的灰色圆盘，却要看到黑的扇形和白的扇形相间着，好象圆盘是不动的似的。

这种现象的原因，我想读者研究了汽车轮子的错觉以后，一定会明白。至于怎样利用这种现象来计算旋转轴转数，自然也是很容易想到的。

技术上的“时间显微镜”

在《趣味物理学》前编里讲过一种利用电影的“时间放大镜”。这里我们要讲另一种能得到类似效果的方法，这是根据上一节讲过的现象的。

我们已经知道，当那每秒钟转 25 转的黑白扇形相间的圆盘（图 145）受到每秒钟闪烁 100 次的电灯照射的时候，我们的眼睛会觉得它好象不在动。现在让我们设想光闪烁的次数是每秒钟 101 次。光闪烁的次数增多了，那末在前后两次光闪烁的时间间隔里，圆盘就不能和以前一样恰恰转完 $\frac{1}{4}$ 转了，也就是说，黑白扇形一定来不及转到跟原来相当的位置上。

这时候我们的眼睛看到它落后了一个圆周的 $\frac{1}{100}$ 。在光第二次闪烁的时候，眼睛又看到它落后了一个圆周的 $\frac{1}{100}$ ，依此类推。我们看到这个圆盘好象是在向后转，每一秒钟转一转。运动看上去好象慢到了只有原来实际的 $\frac{1}{25}$ 。

不难想象，如果要看出同样的慢运动，不过不是在相反的方向上，而是跟实际相同的方向上，应该怎么办。这只要把增加光闪烁的次数改

成减少光闪烁的次数就成。例如，在每秒钟闪烁 99 次的时候，我们就觉得圆盘是在向前转，每秒钟转一转。

这里我们就有了慢到只有原来的 $\frac{1}{25}$ 的“时间显微镜”。可是也完全可能得到比这更慢的运动。例如，如果把光闪烁的次数变到每 10 秒钟 999 次（也就是说每秒钟 99.9 次），那末我们就会觉得圆盘好象是 10 秒

钟转一转，也就是说它慢到只有实际的 $\frac{1}{250}$ 。

任何一种迅速的周期运动都可以使用上面所讲的方法，使它慢到我们的眼睛所希望的程度。这个方法使我们可以很方便地去研究极快的机件的运动，用时间显微镜把它们变慢图 146 . 枪弹飞行速度的测量。到实际速度的百分之一，千分之一。

最后，让我再来介绍一种测定枪弹飞行速度的方法，这方

法也是根据转盘的旋转数可以精确地测出而想出来的。用硬纸做一个圆盘，盘面上画有黑的扇形，并且有折转的边缘，这样圆盘就有了打开的圆筒形盒子的形状。把圆盘装在一个很快转动着的轴上。放枪的人对准这个圆盒子的直径开枪，把盒子的边缘打穿两个洞。假如这盒子是不动的，那末这两个枪眼一定会落在一条直径的两头。但是这盒子是旋转着的，所以在枪弹从盒这边飞到那边的时间里，盒子还来得及转动一小段路，因而枪弹出盒子的地方就不会是 b 点而是 c 点。盒子的转数和它的直径是知道的，因此就可以根据 bc 弧的长短来计算枪弹飞行的速度。这是一种不很复杂的几何学问题，凡是对数学稍微有点研究的读者，都不难把它算出来。

尼普科夫圆盘

最初的电视装置里使用了一种所谓尼普科夫圆盘，这种圆盘也是视错觉在技术上的一种有趣的应用。图 147 是一块厚实的圆盘，在它的边缘附近钻有十二个小孔，直径都是 2 毫米。这些小孔是均匀地沿着一条螺旋线排列着的，每一个比相邻的一个离盘的中心近一个孔的地位。这样的圆盘看上去好象没有什么特别。可是你如果把它装在转轴上，并且在它前面安一个小窗，后面放一张同小窗同样大小的画片。让圆盘迅速地旋转起来，那时候就会发生一种意外的现象：那张在圆盘不动的时候藏在后面的画片，在圆盘转动的时候可以在小窗前面看得非常清楚。如果使圆盘的转动变慢，那张画片也就模糊起来；到最后，圆盘完全不转了，整个画片也就看不见了。这时候，你只能看到那两毫米大小的小孔允许你看到的那一点画面。

让我们来研究一下这圆盘为什么会有这种希奇的效用。我们使圆盘慢慢地转，同时通过小窗细看每一个小孔逐一经过小窗时候的情况。离中心最远的小孔所走的路线离小窗的上部边缘最近。如果这个运动非常

根据本节的原理，已经制成一种实用的仪器——频闪观测器，来测定各种快速变化过程的频率。这种仪器十分精确，例如电子频闪观测器可以精确到 0.001%。

快，这个小孔就能使我们看到画片最接近上部边缘的整条画面。第二个小孔比第一个低，它迅速地通过小窗的时候，能使我们看到同第一条画面相连接的第二条画面（图 149）。第三个小孔使我们看到第三条画面，等等。在圆盘转得足够快的时候，我们因此就能看到整幅画面，就好象我们对着小窗在圆盘上开了一个同样大小的洞一样。

尼普科夫圆盘自己做起来很容易。要使它转得快，可以把一条绳子缠在它的轴上拉，当然，最好是使用小型电动机。

兔子为什么斜着眼看东西？

人是少数能够用两只眼睛同时看一件物体的生物之一。人的右眼的视野跟左眼的视野差不多能迭在一起。

大多数的动物却都是两只眼睛分开看的。它们看到的物体，在轮廓上和我们所看到的并没有分别，可是它们的视野却比我们的要宽得多。图 150 画着人的视野：每一只眼睛在水平方向能够看到的最大角度都是 120° ，并且两个角几乎是互相重叠的（这是说眼睛在不动时候的情况）。

这个图可以同那画着兔子的视野的图 151 比较一下。兔子不必转动头，就不但能够看见前面的东西，并且还可以看见后面的东西。它们左右两眼的两个视野，在前面和在后面都能会合在一起！我们很难偷偷地走近兔子而不把它吓跑，就是这个缘故。从图里又可以清楚地看出，兔子完全看不到就在它鼻子前面的东西。要看十分近的东西的时候，它就只得把头侧过来。

几乎没有例外，凡是有蹄类和反刍类动物，都有这种“环”视的能力。图 152 里画的是马的视野的位置：它们在后面不能会合，可是马只要稍微把头歪一下，就能看到放在后面的东西。它这样看到的物像，当然是不很清楚的，可是在它四周很远的地方出现的很小的动作，都不能逃出它的视线。至于那些行动敏捷、靠袭击别的生物来维持生活的食肉动物，却没有这种环视能力。可是它们具有两眼集中看东西的能力，这就使它们能够准确地估计距离，这样它一跳就可以跳到那里。

为什么在黑暗中所有的猫都是灰色的？

物理学家会这样说：“在黑暗中所有的猫都是黑色的，”这是因为在没有亮光的时候，任何东西都不能看见的缘故。可是在俗语里提到黑暗的时候，并不是指完全黑暗，而是指光线非常弱。所以还是“在夜里所有的猫都是灰色的”这句话更正确。我们不说这句话的借喻的意思，它字面上的意义就是说，在光线不足的时候，我们的眼睛就不能分清颜色，因而每一个表面看上去都是灰色的。

这种说法是不是对呢？难道在昏暗的地方红旗和绿叶真的都会同样是灰色的吗？其实这个说法的正确性是很容易证明的。人们在黄昏看物体的颜色的时候，当然都会感觉到，这时候颜色的差别是消失了，一切物体看上去多少都要呈现出深灰的颜色：无论是红色的被子、蓝色的糊墙纸、紫色的花、绿色的叶，都是这样。

契诃夫在他的著作《信》里说道：“放下窗帘以后，太阳光就射不

进来，象是已经黄昏了，大花束里的所有玫瑰花，也好象变成了同一种颜色。”

精确的物理试验完全证实了契诃夫的这一个观察。如果用很弱的白光来照射涂有颜色的表面（或者用很弱的颜色光线来照射白色的表面），然后渐渐加强照明度，这时候眼睛在一开始只会看见简单的灰色，觉不出有任何颜色。只有在照明度加强到一定的程度的时候，眼睛才能开始看出这个表面是有颜色的。照明度的这一阶段，叫做“色感觉的下阈”。

所以上面这句俗语（许多种言语里都有这句俗语）的字面上的意义也是完全正确的，在比色感觉阈更低的时候，一切物体看上去都是灰色的。

还曾经发现有所谓色感觉的上阈。在照明度太强的时候，眼睛也会分不清颜色的：所有的颜色表面看上去都变成了相同的白色。

第十章 声音·波动

声波和无线电波

声音的传播速度大约只有光的一百万分之一。无线电波的速度和光波的传播速度相同，所以声音的传播速度也只有无线电讯号的一百万分之一。因为这个缘故就产生了一种有趣的后果，这种后果的实质可以用下面的问题来说明：是谁先听到钢琴的声音：是那坐在音乐厅里离钢琴10米远的听众，还是那离大厅100公里用无线电收听这音乐的听众？

说也奇怪，虽然无线电听众比音乐厅里的听众离开钢琴的距离要大10000倍，可是先听到琴音的还是那无线电听众，因为无线电波传过100公里的距离所需要的时间是

$$\frac{100}{300,000} = \frac{1}{3000} \text{ 秒}$$

而声音传过十米距离所需要的时间是

$$\frac{10}{340} = \frac{1}{34} \text{ 秒。}$$

由此可见，无线电传播声音所需要的时间，大约只有空气传播声音所需要的时间的百分之一。

声音和枪弹

儒勒·凡尔纳的炮弹向月球飞去的时候，有一件事使炮弹里的乘客感到莫名其妙，就是他们没听到这门大炮把他们从炮口里射出时候的声音。不过这是必然的。不论这炮声有多大，炮声传播的速度（同一切声音在空气里的传播速度一样）只是每秒340米。可是炮弹却用每秒11,000米的速度前进。炮弹既然赶在声音的前面，放炮时候的声音达不到旅客们的耳鼓，那是可以理解的。

现在我们不谈那幻想的炮弹，而谈真正的枪炮的子弹：是子弹运动得比声音快呢，还是声音比子弹更快，可以警告被射击的人快些躲开？

现在的步枪发射时候传给枪弹的速度，差不多是空气里的声音速度的三倍，就是大约每秒900米（摄氏零度时候声音的速度是每秒332米）。当然，声音是均匀地传播的，而子弹飞行的速度却越来越慢。可是在大部分路线上子弹的速度仍然比声音高。从这里就可以直接得出结论，如果在放枪的时候，你听到了枪声或子弹的啸声，那就不必惊惶了：子弹已经越过你飞向前面去了。还有，枪弹是赶在枪声前面的，所以如果枪弹打中了人，这人应该在枪声到达他的耳鼓以前，就已经打死了。

假爆裂

飞行物体和它所发出的声音之间在速度上的竞赛，有时候会使我们不由自主地做出错误的、跟实际现象完全不同的结论。

许多种新式飞机的速度都比声速高得多。

高高地在我们头上掠过的流星或炮弹就是有趣的例子。从宇宙空间进入地球大气的流星，有非常高的速度。虽然大气的阻力已经把它的速度减慢了，但是它还是比声音的速度高几十倍。

流星划破空气的时候，往往要发出一种类似雷声的噪音。设想我们是在 C 点（图 153），而在我们上面有一颗流星在沿着 AB 线飞行。流星在 A 点发出的声音，只有在流星本身已经飞到 B 点的时候，才能来到我们的耳朵（在 C 点）。因为流星的飞行速度要比声音的速度快得多，所以它能够来得及达到某一个点 D，并使在这个点上发出的声音比它从 A 点发出的声音更早到达我们的耳朵。因此我们先听到的是从 D 点来的声音，然后才听到从 A 点来的声音。又因为 B 点来的声音也比 D 点来的声音到达得更迟，所以在我们头顶上某处应当有这样一点 K，从这一点上，流星发出的声音应当最早到达我们的耳朵。爱好数学的人如果知道流星的速度跟声音速度的比，就能够计算出这个点的位置来。

于是我们就得到这样的结果：我们所听到的和我们所看到的完全不一样。在我们的眼睛里，流星首先出现在 A 点上，接着就从这一点沿着 AB 线飞行。可是对我们的耳朵说来，流星却首先出现在我们头顶上某一点 K 上，然后我们同时听见两个声音，分向两个相反的方向前进，越来越小下去。这两个方向，一个是从 K 到 A，一个是从 K 到 B。换句话说，我们好象听见这颗流星已经爆裂成了两部分，分向两个相反的方向飞去。而在实际上，并没有发生爆裂这回事。请看我们的听觉受到了怎样的欺骗啊！所以许多人说他们亲眼看到过流星爆裂，也许正是由于这种听觉的错觉。

一件幸运的事

假如声音在空气里传播的速度不是一秒钟 340 米，而是比这慢得多，那末听觉发生错觉一定还要多。

举例来说，设想声音每秒钟不是走 340 米，而是走 340 毫米，也就是说，比人的步行还要慢。现在你是坐在椅子上听你的朋友说故事，而你的朋友却有在讲话的时候来回踱步的习惯。在普通的情况下，他这样的踱步一点也不会妨碍你听他的话的。可是在声音的速度变慢了的时候，你就会一点也听不清你的朋友在说什么了。他先发的声音会同后发的声音同时到达你的耳朵，并且混淆在一起，结果你听到的是一片杂声，一点意思也听不出来。

还有，在你的朋友向你快步走来的时候，他说话的声音还会在相反的顺序里到达你的耳朵：他刚发的声音会最先来到，早发的声音会后一步来到，更早发的到得更迟。因为说话的人在赶着自己的声音，并且始终在声音的前面，继续发出新的声音。这时候，在他所说的那些话里，除非有许多都是象回文体那样倒过来听也是一样的意思，那你就一句都听不懂了。

最慢的谈话

不过，假如你认为声音在空气里的真正速度（每秒 $\frac{1}{3}$ 公里）永远是足够了的话，那你读了这一段以后，就会改变自己的意见了。

设想在相距 1000 公里的两地之间没有电话，只好装设从前那种在大商店里连接各个房间的传话筒，或者在轮船上为了同机器间通话而装设的传话筒。在通话的时候，你站在这个长线路的这一头，而你的朋友站在那一头。你问他一句话，等候对方回答。可是等了 5 分钟，10 分钟，15 分钟，20 分钟，25 分钟回音还是没有。你开始焦急起来了，也许会想到同你通话的对方可能出了什么意外了吧。可是你这种担忧是多余的：你的问话还没有到达那一头，这时候它还在半路上呢。再要等二、三十分钟，你的那位朋友才能听到你的问话，并且给你答复。可是他的答复从那一头到这一头还得走那么长时间。因此，你发问以后得过一个多小时，才能听到答复。

让我们验算一下：两地相距 1000 公里；声音每秒钟走三分之一公里；这就是说，声音在这两地之间得走 3330 多秒钟，或者五十五分钟多一些。在这种条件下，从早到晚整天通话，也只能彼此交换十来句话罢了。

声云和空气回声

不但坚硬的障碍物可以反射声音，就象云一类柔软的东西也能够反射声音。不但这样，甚至连完全透明的空气，在某些条件下，就是在这部分的空气的传声的能力由于某种缘故变得同其余的空气不同的时候，也能够反射声音。这里发生的现象同光学里所谓“全反射”相象。无形的障壁把声音反射了回来，使我们听到一种不知从哪里来的回声。

这件有趣的事实是丁铎尔偶然在海边做声音信号试验的时候发现的。他说道：“我曾经得到过从完全透明的空气反射过来的回声。这种回声好象是用魔术从无形的声云里送回来的。”

他所说的声云就是部分能够截住声音、强迫它反射回来、因而产生从“空气来的回声”的透明空气。关于这一点他是这样说的：

声云经常飘浮在空中。它们跟普通的云雾没有什么关系。极透明的空气里也许也充满着这种云。这样就会得到空气回声；所以和流行的见解相反，这种回声就是在最明朗的大气里也可能发生。观察和实验证实了有这样的空气回声存在着。冷热不同或所含的水蒸气数量不同的气流，都可以产生空气回声。

能够反射声音的声云的存在，可以解释某些在作战当中有时候能够看到的怪现象。丁铎尔从一个亲自看到 1871 年普法战争的人写的回忆录里，引了下面一段话：

六日早晨跟前一天早晨完全相反。昨天是刺骨的寒冷并且有雾，半里路以外谁也看不见东西。可是六日的天气晴朗而和暖。昨天空中充满着声音，而今天却平静得和那不知道有战争的桃花源里一样。我们惊异

著者在这里略去了声音的振动随距离而减小这一点。实际上，在这样长的线路两端，通话的人是什么也听不见的。

地你看着我，我看着你。难道巴黎和它的堡垒、大炮、轰击都消失得无影无踪了吗？……我坐车来到了蒙莫兰西，从这里我可以看见巴黎北郊的宽广的全景。可是这里也是死一般地沉寂……我遇到三个士兵，我们于是开始推测目前的局势。他们都在想这时候大概是在开始和谈了，因为从清晨起，就一声枪响也没听到过……

我又继续前进到霍涅斯。可是这使我非常惊奇，因为我听说德国人的大炮从早晨八点钟起就在猛烈地轰击。在南方，炮击也是在差不多时间开始的。可是在蒙莫兰西，我却没有听到一点声音！……这一切都和空气有关系：今天它传声的能力很差，而昨天却很好。

类似的现象在 1914 到 1918 年的第一次世界大战当中，也曾经不止一次地出现过。

听不见的声音

有些人听不见象蟋蟀的鸣声或蝙蝠的吱吱声那样尖锐的声音。这些人的耳朵并不聋——他们的听官很好，可是他们竟听不见非常高的音调。丁铎尔肯定说，有些人甚至连麻雀的叫声都听不见。

一般说来，在我们附近发生的振动，我们的耳朵觉察不到的多得很。如果一个物体一秒钟振动的次数不到 16 次，这声音我们就听不见。如果振动高到 15,000 到 22,000 次以上，我们也听不到它。各人能够察觉的音调的最高界限是各不相同的；老年人的这种最高界限可以低到每秒钟 6000 次。因此有时候会发生这样的怪现象：有些人能听到刺耳的高音，有些人却不能听到。

有许多种昆虫（象蚊子和蟋蟀）发出的声音，振动次数是每秒钟 20,000 次。这些音调当然是有些人听得见，有些人听不见。有些不能觉察高音的人，往往在别人觉得杂乱以及有非常刺耳的声音的地方，感到十分安静。丁铎尔曾经谈到有一次他和一位朋友在瑞士游玩的时候遇到的一件跟这类似的偶然事情，他说道：“大路两旁的草地里到处都是昆虫。在我听来，这里的空中充满着尖锐的虫鸣声，可是我的朋友却什么也听不见：昆虫的音乐越出了他的听觉范围。”

蝙蝠的吱吱声比昆虫的刺耳的鸣声要低一个八音度，那就是说，在这种情况下空气振动的次数还要慢一半。可是也有人因为他们的音调觉察力的最高界限还要低，所以蝙蝠对于他们说来也是一种不会发声的动物。

相反地，正象巴甫洛夫的实验室里所证明的那样，狗却能够察觉振动次数高到每秒 38,000 次的音调，但这已经是“超声”振动的领域了。

超声波在技术上的应用

今天的物理学家和技术专家已经有方法可以创造振动频率比刚才说过的高得多的“听不见的声音”，超声波的振动频率可以高到每秒钟 10,000,000,000 次。

产生超声波的一种方法是利用石英片的一种性能，石英片是用一定

的方法从石英晶体上切下来的，在压缩的情况下，它的表面会起电__。

如果反过来，在这种石英片的表面上周期地使它带电，那末这表面就会在电荷的作用下，交替着一伸一缩，也就是起了振动：使我们得到超声波振动。使石英片带电，得用无线电技术里所用的电子管振荡器，振荡器的频率可以挑选同石英片“固有”振动周期相合的__。

超声波虽然不能被我们听见，但是它们却能用别的极显明的方式来显示出它们的作用。例如，如果把振动着的石英片浸在油缸里，那末，在受到超声波作用的那一部分液体的表面上，就会激起高达 10 厘米的波峰，同时还有小油滴飞溅到 40 厘米高的。把一根长一米的玻璃管的一头浸在这油缸里，并且用手抓住玻璃管的另一头，你的手就会感到非常烫，烫得你的皮肤上会留下伤痕。让这玻璃管的一端跟木料接触，会把木料烧穿一个洞；超声波的能量变成了热能。

现在各国的研究家都在仔细地研究着超声波。这种振动对于生物能够发生强烈的作用：遇到它们，海草的纤维会裂开，动物的细胞会破碎，血球会破坏，小鱼和蛙类会在一二分钟里面被杀死。

用超声波做实验的时候，动物的体温会提高，譬如老鼠的体温会提高到摄氏 45 度。以后超声波还一定会在医药方面起相当重要的作用；听不见的超声波会同看不见的紫外线一起，帮助医师治病。

特别有成就的是在冶金术方面，人们利用超声波来探察金属内部是不是均匀，有没有气泡、裂缝等缺点。利用超声波来“透视”金属的方法，就是把被检查的金属浸在油里，然后使它受到超声波的作用。这时候金属里不均匀的区域就会把超声波漫射开，投射出一种好象是“声音的阴影”来。结果，在那均匀的油面上就会出现金属的不均匀部分的轮廓，这轮廓非常明显，甚至可以照下像来__。

用超声波可以“透视”厚到一米以上的金属，这是用爱克斯射线来透视所完全做不到的。超声波在这时候可以发现极小的、小到一毫米的不均匀的部分。毫无疑问，超声波是有非常远大的前途的__。

小人国居民的声音和格列佛的声音

在影片《新格列佛游记》里，那些小人是用高音说话的，因为只有高音才跟他们的小喉头配合，而大人比佳却用低音说话。

但是在拍摄这张影片的时候，扮演小人的是些成年演员，扮演比佳的是个孩子。那末，影片上的声调又是怎样使它改变的呢？我听了导演的话以后，也觉得十分诧异，他说，演员们在拍摄的时候都是用自己本来的嗓音说话的。他又告诉我，在拍摄的过程中，他用了一种根据声音的物理特点而想出来的方法，这就改变了音调。

为了使小人的声音变高，格列佛的声音变低，电影导演用动得很慢的录音带来记录小人演员的说话；相反地，用动得很快的录音带来记录比佳的说话。在银幕上却用普通的速度放映这影片。

放映的结果正合需要是不难理解的。小人的声音来到听众耳朵里的时候，既然比正常的声音振动次数多，那末音调当然就变高。比佳的声音来到听众耳朵里的时候就比正常的声音振动次数少，这样音调当然就变低。总起来说，在这张影片里，小人说话的音调要比普通成人高一个

五度音程，而格列佛——比佳——却比普通音调低一个五度音程。

“时间放大镜”就这样独特地被利用来处理声音。我们开留声机的时候，如果所用的速度比录音的速度（每分钟 78 转或 33 转）大或小，也常常可以发生这种现象。

什么人每天可以收到两天的日报？

现在我们要研究一个问题，这个问题初看好象跟声音和物理学都完全没有关系。可是我却请你们分出一些注意力，因为这个问题能帮助我们理解下一节的内容。

这个问题的形式变化很多，也许你已经遇到过这个问题的某一种形式了。从甲地每天中午向乙地开出火车一列。同时，每天中午有一列火车从乙地开往甲地。火车在路上假定要走 10 天。现在问：你从乙地出发到甲地，路上一共会遇到多少列从甲地来的火车？

大家常常这样回答：10 列。在一次数学家会议上，曾有一位数学家在吃早点的时候，向大家提出过这个问题，就有几位学者也是这样回答的。可是这样的回答是错的：你一路不但会遇到你动身以后从甲地开出的 10 列火车，还会遇到你动身以前已经在路上的那 10 列火车。所以正确的答案是 20，不是 10。

再说，每一列从甲地开出的火车，都要装出当天出版的甲地报纸。如果你对甲地的新闻很感兴趣，你当然会在车站上购买这种报纸。那末，问你在 10 天的旅程里，能买到多少天的甲地报纸？

对于这个问题，你现在已经不难得到正确的答案：20。因为你遇到的是 20 列火车，而每一列火车都带着出发那天出版的报纸，所以你买到的报纸也是 20 天的，——也就是说，你每天可以读到两天的报纸。

这个结论似乎有些出乎意料。如果你没有机会从实践当中证明它的正确性的话，你也许会不肯马上相信这个结论的。

火车上的汽笛声问题

如果你的听官很能辨别乐音，那末迎面开来的火车在你旁边经过的时候，你一定会注意到火车头上的汽笛声的音调有什么样的改变（这里是说音调，或声音的高低，不是说响度）。在两列火车接近的时候你听到的汽笛的音调，一定比两列火车相背离去越开越远的时候的音调高得多。如果火车驶得很快（每小时 50 公里），那末音调高低上的区别，几乎可以达到一个全音程。

这到底是什么原因呢？

如果你记得音调的高低同振动的次数有关，你就不难猜想到这原因了；你可以把这问题拿来同你研究上节问题的时候所得到的结果比较一下。迎面驶来的火车上的汽笛，自始至终发着一定振动次数的声音。可是你的耳朵却会觉察出不同的振动次数，这是看你是迎着火车走的，还是站着不动的，或是背着声源走的。

你坐火车上甲地的时候，每天读到甲地报纸的次数既然比平时多，那末同样的道理，在你向着声源走近的时候，你每秒钟听到的振动次数，

也比它们从火车头的汽笛里发出来的振动次数多。不过在这里你已经不必再思考了：你的耳朵已经能听出它的振动次数是增多了，——你直接听到了提高了的音调。在你背着火车走的时候，你的耳朵听到的振动次数是减少了，——你听到的是降低了的音调。

如果这个解释还不能使你完全信服，那就请你直接研究一下（当然是通过思考），从火车汽笛里发出来的声波是怎样

传播的。首先研究一下火车不动时候的情况（图 154）。汽笛发声的时候会使空气产生波动，为了简单起见，让我们假定只看到 4 个波（图里上面那条波状线）：波从不动的汽笛里出来以后，它在任何时间间隔里，向一切方向传播的距离都是相同的。0 号波来到观察人 A 的时间，和来到观察人 B 的时间是相同的。跟着同时来到两个观察人的耳朵里的是 1 号波，2 号波，3 号波等等。两个观察人的耳朵每秒钟可以得到同样数目的振动，因此两人听到的音调也是相同的。

如果鸣着汽笛的火车是从 B 驶向 A 的（图里下面那条波状线），那就是另一回事了。设想在某一瞬间，汽笛是在 C 点，而在它发完了 4 个波的时候，它已经来到了 D 点。

现在你可以比较一下，这时候声波是怎样传播的。从 C 点发出的 0 号波，到达 A 和 B 两个观察人的时间是相同的。可是在 D 点发出的 4 号波，到达两个观察人的时间就不相同：路线 DA 比路线 DB 短，因此这个波来到 A 点的时间比它来到 B 点的时间要早。中间的那些波（3 号波，2 号波，1 号波）也要先到 A 后到 B，不过相差的时间比较短些。结果怎么样呢？在同一时间里 A 点的观察人收到的声波次数一定比 B 点的观察人收到的多：于是 A 点的观察人听到的音调也比 B 点的观察人听到的高。同时，从图里还可以看出，走向 A 点的波，它的长度也相应地比走向 B 点的波要短些。

多普勒现象

我们刚才谈的现象是物理学家多普勒发现的，所以这个现象就和他的名字连在一起。这种现象不但可以在声音方面看到，在光的现象上也可以看到，因为光和声都是用波的形式传播的。波的次数增多（在声方面，使我们觉察到音调的变高）使我们的眼睛觉察到颜色的变化。

多普勒的定律使天文学家不但能发现某一颗星是向着我们移近还是离开我们远去的，并且还能测定它们移动的速度。

这一方面帮助天文学家的，是出现在光谱上的一些暗线向一旁移动位置这一个现象。天文学家仔细研究了天体光谱上暗线移动的方向和距离以后，就得到了许多惊人的发现。例如，由于多普勒现象，我们现在知道天空中最亮的星——天狼星，在用每秒钟 75 公里的速度离开我们远去。这颗星离开我们是这样的远，就是离开我们再远几十万万公里，也不会显著改变它的视亮度。所以假如没有多普勒现象帮助我们，我们大概就很难知道这个天体的运动的情况。

这个例子非常清楚地说明了物理学真是一门范围很广的科学。确定了有关长到几米的声波的规律以后，物理学又把这规律应用到短到万分之几毫米的光波上，然后又利用这些知识来测量那些在无边无际的宇宙

空间里急速飞行的庞大恒星的动向和速度。

一笔罚金的故事

多普勒在 1842 年第一次想到，观察人跟声源或光源互相接近或远离的时候，观察人的感官同时应该觉察到声波或光波的波长的变动。就在这时候，他又提出了一种大胆的意见，认为恒星所以有各种不同的颜色，也是由于这个原因。他想，所有恒星本身的颜色都是白的；至于有许多恒星看上去有颜色，那是因为它们对我们说来运动得很快。很快走近我们的白星会向地面上的观察者发出缩短了了的，使我们产生绿色、蓝色或者紫色感觉的光波。相反地，很快地离开我们的白星，看上去就会是黄色的或者是红色的。

这的确是个独特的、可是无疑是错误的想法。为了使我们的眼睛能够觉察到恒星因运动而产生的颜色的变化，首先需要恒星有巨大的速度——每秒钟几万公里的速度。可是这样还嫌不够：因为在飞来的白星所发的蓝色光线变成了紫色的时候，它的绿线也会变成蓝线，紫线变成紫外线，红外线变成红线；总之，白光里的各种成分都还存在，因为光谱上所有颜色的位置虽然都有了移动，可是这些颜色的总和在我们的眼睛里应该没有什么改变。

至于跟观察者有相对运动的恒星的光谱里暗线位置的移动，却是另一回事了：暗线位置的移动可以用精确的仪器准确地测出来，使我们能够从我们看见的光线来决定恒星运动的速度（好的分光镜连每秒一公里的恒星速度都能确定出来）。

多普勒的错误使我们想到现代物理学家乌德的轶事。乌德有一次把自己的汽车开得太快了，在红灯信号面前来不及停下来，于是警察准备对他罚款。乌德告诉这位维持交通秩序的人说，在车辆疾驰的时候，红色信号的光是会被看成绿色的。假如这位警察是通晓物理学的，他一定能够算出，汽车必须有极大的速度，大到每小时 13,500 万公里，才能用科学家的话来为这辩护。

算法是：如果用 λ 代表光源发出的光的波长（这里的光源是信号灯）， λ' 代表观察者觉察到的光的波长（这里的观察者是汽车里的科学家）， v 代表汽车的速度， c 代表光速，那末，根据理论，这些数值之间的关系是这样：

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + \frac{v}{c}。$$

我们知道，红色光线里最短的波长等于 0.0063 毫米，绿色光线里最长的波长等于 0.0056 毫米，又知道光速等于每秒 300,000 公里。把这些数字代到上面式子里，得到：

$$\frac{0.0063}{0.0056} = 1 + \frac{v}{300,000}，$$

从这里得出汽车的速度是：

$$v = \frac{300,000}{8} = 37,500 \text{ 公里/秒}，$$

或每小时 13,500 万公里。乌德如果有了这种速度，那他在一小时多一些

的时间里，就能从警察身旁一直驶到比太阳还远的地方去。据说，他终究还是因“超过规定速度”被罚了款。

用声音的速度走路

假如你用声音的速度离开一个正在演奏音乐的大会，你会听到些什么呢？

坐着邮政火车从甲地出发的人，在沿路所有车站上，会看到卖报人手里拿着的甲地报纸都是同一天的——也就正是他出发那天出版的报纸。这是可以理解的，因为这一天的报纸是同旅客一起出发的，至于后来新出的报纸却要乘后来的火车出发。拿这做根据也许就可以推论到：用声音的速度离开音乐会的时候，我们会在全时间里听到同一个音，也就是我们出发时候在音乐会上听到的那个音。

可是这个推论是不正确的。如果你用声音的速度离开，那末声波对你来说是不动的，它根本不能振动你的耳膜，因此你也就不能听到任何声音。你会认为音乐会已经停止演奏了。

那末同报纸来比较，为什么会使我们得到不同的答案呢？那只是因为在这件事里用错了类比法。到处遇到同一天报纸的旅客，如果忘记了自已是在前进的话，那他就一定会认为，甲地的报纸从他出发那一天起，已经停刊了。对于他，报纸好象是已经停了刊，正象对于一个运动着的听者，音乐已经停奏了一样。有趣的是，这个问题虽然并不太复杂，可是有时候连科学家也要被它弄糊涂。在我还是一个中学生的時候，我曾经同一位天文学家（他现在已经死了）发生过争论。当时他就不同意上面这个结论，却硬说我们用声音的速度离开的时候，我们应当永远听到同一个音。他在信里写着自己的理由，下面是从他的信里摘下来的一段：

设想有一个某一定高度的音在响着。它过去是用这个音在响着，将来这个音也要无穷尽地响下去。排列在空间里的许多观察者一定能顺序地听到这声音，并且假定这声音并不减弱。那末如果我们用声音的速度或者甚至用思想的速度，来到任何一位这种观察者的地方，为什么就不能听到它呢？

他又用同样的理由证明，一个用光的速度离开闪电的观察者，会在全部时间里不断地看见这个闪电。他写给我的信里说：

设想在空间连续地排列着许多眼睛。每一只眼睛都要接着前面的一只眼睛收到光的印象。再设想你能理想地并且顺序地来到每一个这种眼睛所在的地方。那就很显然，你在全部时间里，都会看见闪电。

当然，他的这两种说法都是不对的：在上面说的条件下，我们是听不到声音也看不见闪电的。290 页里的式子，也能使我们看出这一点。我们在这个式子里假定 $v=-c$ ，那末，眼睛所觉察到的 就变成了无限。

无限就等于没有波。

《趣味物理学》写到这里结束了。如果它能使读者引起一种愿望，想要深入研究这门他已经从这里获得了一些简单知识的科学的广大领域，那作者的任务就算已经完成，目的已经达到，并且可以带着满意的心情，在最后一个字的后面加上一个句点了。

重版后记

这部书是苏联科普作家雅·依·别莱利曼继《趣味物理学》之后编著的又一部科普读物。本书取材和《趣味物理学》比较，大致相同。初版于半个世纪以前，以后曾多次修订重版。我社在五十年代曾根据当时的新版本翻译出版。现在科学技术正突飞猛进，物理学有了许多重大的新发展。但作为一部讲述初等物理学基本原理的科普读物，本书仍具有一定的参考价值。我社不久前修订重版了《趣味物理学》，现在根据广大读者的要求，参照苏联 1976 年第 19 版，并考虑到我国读者的现实情况，对我社 1964 年的译本作了一些修订，予以重版。

中国青年出版社

(京)新登字 083 号

图书在版编目(CIP)数据

趣味物理学续编 / (苏)别莱利曼著;滕砥平译. - 2版. - 北京:
中国青年出版社, 1996. 10

ISBN 7—5006—2313—5

. 趣... . 别... 滕... . 物理学-普及读物 . 04—49
中国版本图书馆CIP数据核字(96)第19260号

社址: 北京东四12条21 号 邮政编码: 100708
东华印刷厂印刷 新华书店经销

787 × 1092 1 / 32 9.5 印张 160 千字
1956年12月北京第1版 1979年11月北京第2版
1996年10月北京第5次印刷
印数 447, 001—452, 000 册 定价 10.00 元

