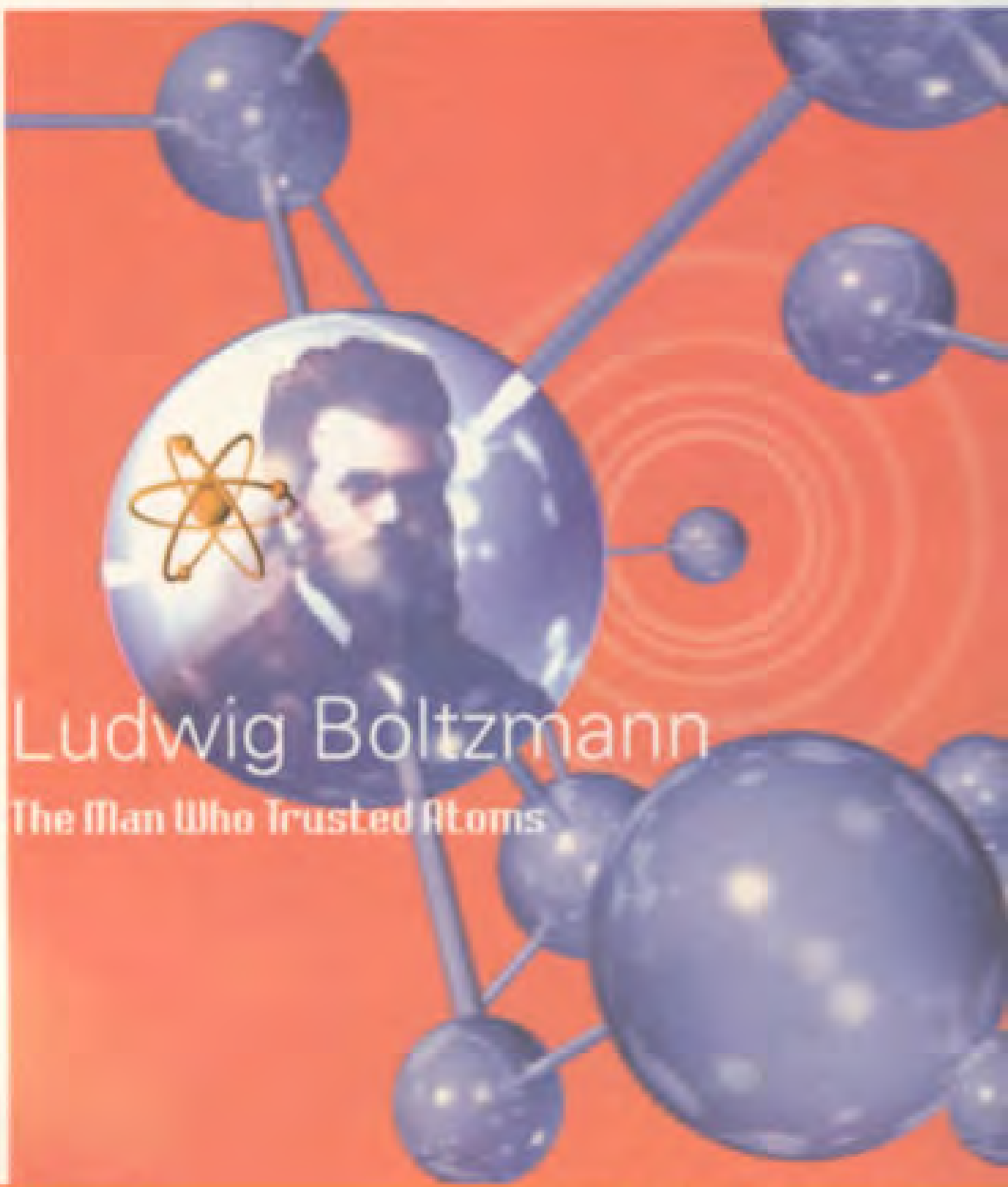
开放人文



[意] 卡罗·切尔奇纳尼 著　　胡新和 译　　Carlo Cercignani

玻尔兹曼
笃信原子的人

上海世纪出版集团

世纪出版

ISBN 7-5323-8370-9

9 787532 383702 >

定价：44.00 元

易文网：www.ewen.cc

玻尔兹曼

笃信原子的人

[意] 卡罗·切尔奇纳尼 著　　胡新和 译

世纪出版集团　上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据
玻尔兹曼：笃信原子的人/（意）切尔奇纳尼著；胡新和译. —上海：上海科学技术出版社，2006.4
（世纪人文系列丛书）
ISBN 7-5323-8370-9

Ⅰ. 玻… Ⅱ. ①切…②胡… Ⅲ. 玻尔兹曼（1844～1906）-传记 Ⅳ. K835.216.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 011927 号

责任编辑 武时勉 吕 芳
装帧设计 陆智昌

玻尔兹曼——笃信原子的人
[意] 卡罗·切尔奇纳尼 著
胡新和 译

出　　版　世纪出版集团　上海科学技术出版社
　　(200235　上海钦州南路 71 号　www.ewen.cc　www.sstp.cn)
发　　行　上海世纪出版集团发行中心
印　　刷　上海宝山江杨印刷厂
开　　本　635×965 mm　1/16
印　　张　26
字　　数　312 600
版　　次　2006 年 4 月第 1 版
印　　次　2006 年 4 月第 1 次印刷
ISBN 7-5323-8370-9/N·233
定　　价　44.00 元

世纪人文系列丛书编委会

主任

陈　昕

委员

丁荣生　王一方　王为松　王兴康　包南麟　叶　路
何元龙　张文杰　张晓敏　张跃进　李伟国　李远涛
李梦生　陈　和　陈　昕　郁椿德　金良年　施宏俊
胡大卫　赵月瑟　赵昌平　翁经义　郭志坤　曹维劲
渠敬东　潘　涛

出版说明

自中西文明发生碰撞以来，百余年的中国现代文化建设即无可避免地担负起双重使命。梳理和探究西方文明的根源及脉络，已成为我们理解并提升自身要义的借镜，整理和传承中国文明的传统，更是我们实现并弘扬自身价值的根本。此二者的交汇，乃是塑造现代中国之精神品格的必由进路。世纪出版集团倾力编辑世纪人文系列丛书之宗旨亦在于此。

世纪人文系列丛书包涵“世纪文库”、“世纪前沿”、“袖珍经典”、“大学经典”及“开放人文”五个界面，各成系列，相得益彰。

“厘清西方思想脉络，更新中国学术传统”，为“世纪文库”之编辑指针。文库分为中西两大书系。中学书系由清末民初开始，全面整理中国近现代以来的学术著作，以期为今人反思现代中国的社会和精神处境铺建思考的进阶；西学书系旨在从西方文明的整体进程出发，系统译介自古希腊罗马以降的经典文献，借此展现西方思想传统的生发流变过程，从而为我们返回现代中国之核心问题奠定坚实的文本基础。与之呼应，“世纪前沿”着重关注二战以来全球范围内学术思想的重要论题与最新进展，展示各学科领域的新近成果和当代文化思潮演化的各种向度。“袖珍经典”则以相对简约的形式，收录名家大师们在体裁和风格上独具特色的经典作品，阐幽发微，意趣兼得。

遵循现代人文教育和公民教育的理念，秉承“通达民情，化育人心”的中国传统教育精神，“大学经典”依据中西文明传统的知识谱系及其价值内涵，将人类历史上具有人文内涵的经典作品编辑成为大学教育的基础读本，应时代所需，顺时势所趋，为塑造现代中国人的人文素养、公民意识和国家精神倾力尽心。“开放人文”旨在提供全景式的人文阅读平台，从文学、历史、艺术、科学等多个面向调动读者的阅读愉悦，寓学于乐，寓乐于心，为广大读者陶冶心性，培植情操。

“大学之道，在明明德，在新民，在止于至善”（《大学》）。温古知今，止于至善，是人类得以理解生命价值的人文情怀，亦是文明得以传承和发展的精神契机。欲实现中华民族的伟大复兴，必先培育中华民族的文化精神；由此，我们深知现代中国出版人的职责所在，以我之不懈努力，做一代又一代中国人的文化脊梁。

上海世纪出版集团
世纪人文系列丛书编辑委员会
2005年1月

序

当今物理学所提供的标准物质图景告诉我们，一般的宏观物质是由原子所构成的。尽管这一图景的要点可以回溯到早期希腊时期，但对它的普遍承认却是相当近晚的事。从大约 19 世纪中叶起，一批人数逐步增长的物理学家确实趋于认可原子的实在性，但仍有许多人认为这个“原子假说”不过是方便的虚构，并未反映出任何真正微观层次上的实在性。

然而，这一“工作假说”使物体的(并不明显的)宏观性质得以被推论。原则上只要知道了支配单个原子的规律，也就提供了推论物质总体性质的手段。然而，实际上并不存在这么一种由构成宏观物体的全部原子运动的详尽计算来得出其宏观表现的程序，因为组成一般宏观系统的原子数目太大了。例如，一立方厘米空气中就包含有 10^{19} 个原子。这样，按照我们的标准图景，要推论宏观物质的表现，就必须采用**统计**方法，由对个体原子物理参量的适当的统计

平均，来得出支配宏观行为的规律。在19世纪下半叶，一些物理学家开始制定出这样的程序，而**路德维希·玻尔兹曼**正是这些物理学家中杰出的一位。

玻尔兹曼是另两位伟大的理论物理学家——19世纪的詹姆斯·克拉克·麦克斯韦与20世纪的爱因斯坦之间的中间环节。麦克斯韦以发现了支配电磁场和光的规律而著称，他也首先得出了平衡态中气体粒子速度的概率分布公式。然而，是玻尔兹曼推导出了支配概率分布的动态演变的方程，按照这一方程，气体的状态(并非必然处于平衡)实际上是变化的。玻尔兹曼的观念对于其后马克斯·普朗克在世纪之交关于黑体辐射的分析极为重要，正是在这一分析中，普朗克引入了**作用量子**，由此宣告了量子革命的发端。1905年，爱因斯坦不仅把握住这一观念，并且进一步发展了它(实际上表明“原子假说”甚至可应用于光本身！)，他的另两项著名的工作也受到玻尔兹曼的概念的影响。其中一项提出了确定分子大小的方法，另一项则解释了布朗运动的性质，认为液体中悬浮粒子的运动是由于组成液体的分子碰撞造成的。这两篇文章都极大地支持了“原子假说”，增强了我们对于这一实在图景的信心。

玻尔兹曼方程在**数学上**也很重要，因为它是第一个描述了概率的随时间变化的方程。然而它的重要性还不仅于此。它还引出了具有深刻的物理意义，甚或深刻的哲学意蕴的问题，其中有些时至今日，也只不过部分被解决。因为不同于那些支配组分粒子自身的基本动力学方程，当时间方向反转时，玻尔兹曼方程并非保持不变。玻尔兹曼方程的时间不对称性被作为热力学第二定律的一个方面而提出，按照这一定律，来自平衡态的系统的熵将随时间而增加。“熵”的原初意义为“无序”，因此粗略地说，热力学第二定律告诉我们一个系统的秩序在不断地削减。然而这正是玻尔兹曼的又一个重要贡献，即通过把熵等同于由限定系统态的宏观参量所确定的相空间体积的对数的特定倍数，从而给出了熵的**精确**定义。由

此，玻尔兹曼也表明热力学第二定律如何能修改以适应于精确的数学处理。

一个描述其组分粒子都满足时间对称定律的宏观系统整体行为的方程，何以会是时间不对称的呢？ 面对着众多同时代人的批评，玻尔兹曼深刻地思考着这些问题，(正确地)认识到不对称的起源必须回溯遥远的过去中的一个非常特殊的状态，并且必然最终植根于相关的宇宙学思考中。 然而事实上，在玻尔兹曼的时代，关于宇宙学人们还一无所知，因此他除了引入某些权宜之计但并非思辨的观念外，无从把这一论证再加推进。 而在人们对于现实宇宙的整体时空本性所知甚多的今天，这些问题则充满生机，因为它们告知我们之事，对于宇宙“大爆炸”起源的本性，对于迄今为止某些未知的在关键时刻发挥了关键作用的物理原理，都有着极其重要的意义。

为玻尔兹曼所如此坚定信奉的“原子假说”当前的情形如何呢？尽管这的确是目前关于一般物质的亚微观性质的公认图景，现在事情却有了一个另外的转折。 这一转折来自于量子理论，而正是玻尔兹曼的观念无意中成了这一理论的助产士。 量子化粒子在若干方面不同于经典粒子。 它们所服从的统计方法与经典粒子适用的玻尔兹曼统计有微妙的区别，每个经典粒子都允许拥有其自身的同一性。 此外，量子化粒子并没有独特限定的位置和速度，严格地讲，它们的集合必须被看作是(“纠结”在一起的)一个整体，而不是各自有着自己状态的个体的集合。 还有，一个连续场和一个个体粒子集合之间的区别也决非如经典图景(如普朗克和爱因斯坦对黑体辐射的处理在开始时所描述的图景)中那样清晰。 就这些特点而言，一个显著的事实就是玻尔兹曼的“经典”原子图景在常规条件下会如此惊人地成功。在我看来，依然有些与此相关的问题尚未解决。

然而玻尔兹曼本人却并非一个只执著于一种图景而置其他图景于不顾的教条主义者。 尤其是从他晚期生活中所表现出来的不确定和不满足的性格特征(这在他晚年生活中尤为明显)导致了他最终的悲惨

结局的深刻的敏感性来看，很难想象他是这样一位科学家。

在本书中，卡罗·切尔奇纳尼给我们提供了关于玻尔兹曼的生平和科学成就、他与其同时代人之间的相互影响的最为动人的和最权威的叙述。这也是对于科学史上的一个重要时代的描述。

罗杰·彭罗斯

自　　序

在本书中，我试图呈现出路德维希·玻尔兹曼的生平和个性、科学研究和哲学思想，呈现出他的生活环境，以及他与同时代的其他伟大科学家之间的交往。这一项事业看上去非个人的能力所能及（尤其是当这个人非专业从事于科学史时）。然而，它之所以可能，有赖于事实上这一主题吸引了许多科学家和科学史家。我参考了他们的研究，当需要时也引用了那些想更深入地探索这一主题和进行适当的比较的人的工作。当然，这些材料所呈现的形式则完全由我负责任。

玻尔兹曼在科学史上以一个独特的形象出现。他被同时代人认为是一个伟大的科学家，但他却必须为坚持他的受到严厉批评的思想而战斗。通常，这是因为他在宣布他的设想时不够严谨，甚至是由于这么一个事实，即一个真正创新的科学家常常并未认识到，他正偏离公认的理论有多远。科学中的革命经常是以一种相当保守的方式进行的，它们的革命性只有在后人眼中才得以辨别出来。

值得注意的是，除了少数例外，玻尔兹曼的科学论文没有被翻译成英文，而对于其他同等的或不如他重要的科学家，这项工作都已完成。有鉴于此，许多玻尔兹曼的工作只是通过他人的表达才为人所知，但这种表达却并非总是真实可信的。而与此同时，对于存在一个作为宏观世界的基础的微观原子结构这一事实来说，他却是贡献最大的人。他的工作影响了现代物理学，尤其是通过普朗克关于光量子的工作和爱因斯坦关于布朗运动的工作。因此，把玻尔兹曼看作是连接 19 世纪和 20 世纪的物理学的桥梁，显然并不过分。

这种情形今日已得到确认。玻尔兹曼是一场科学革命的中心，他在许多关键问题上都是正确的。然而，当玻尔兹曼的名字被提起时，总是伴随着他的同时代人对他的批评的回响。他对这些批评的回答，从他的时代的物理学的观点来看，是一清二楚的，并且保持着其根本上的精确性。只要适当地理解，他的基本结论也能被表述为数学定理。其中有些已得到证明，其余的则仍然处于有可能但尚未得到证实的猜想的水平上。

当然，随着时光流逝，文化的世界观也在改变。一代人曾当作是问题或解答的东西，不再为新的一代以同样方式来解释。对玻尔兹曼的思想或许也同样如此。确实，玻尔兹曼没能预见到量子力学或是广义相对论，但他敏锐地意识到这一事实，即在原子理论和经典力学中，有着有待于更好理解的问题。他的文章中的一些章节，看上去就像是对于未来发展的预言。

玻尔兹曼的发现具有概念上和实践上的双重意义。尽管如此，有时人们谈起这些发现来，就像是在谈论哲学问题。用今日的眼光看，玻尔兹曼也确实是一位哲学家，如本书第十章中所讨论的，但他并没有把他自己的工作哲学化。他宁愿去讨论一般知识理论的基本问题和科学哲学。具体地说，他预期了库恩的科学革命理论，提出了一种基于达尔文进化论的知识理论。

然而今天，玻尔兹曼的基本教诲已被忘却。大多数人(包括科学

家)只是通过二手的资料来源来了解他的科学工作，在他们写出的书中，甚至于他的最清楚的成果，也笼罩在一种神秘的气氛中。按照一种流行的观点，对一些哲学家来说，没有比某些模糊而又神秘的观念更好的了，没有人真正关心它们，确实也无法检验它们，因此他们有充分的空间来作聪明的论证。然而，对于科学概念和理论有着严肃兴趣的科学家和哲学家并不如此。

从风格上讲，本书有着两重特性：其主要部分实际上没有方程，是为那些并非统计力学专家的读者而作的。然而有些章节则深入到主题的某些技术方面，尤其是那些有关玻尔兹曼方程的部分。那些置于卷末的材料使得本书可用作一种从历史角度描述的、然而又是严谨统计力学教程(或部分教程)，显然有些章节可因此省略。

在书中各处，我都致力于避免含糊，这种含糊在许多面向一般公众的表达中，是时时会遇到的情形。换言之，我努力避免这样的语句，它们看上去非常深奥，但经更认真的分析，却证明有双重的含义：一种含义虽然正确，却并不重要，另一种含义则看上去深刻，但不幸是错误的。我的这一选择或许会使阅读比较困难，但读者的努力却希望能得到如此的回报，即有可能理解这位使我们对于自然的认识变得清晰的伟大科学家的观点。

我要感谢路德维希·玻尔兹曼的孙女伊尔莎·法佐尔-玻尔兹曼夫人，他的孙子迪特尔·弗拉姆教授，感谢他们惠允从他们编辑的书籍(分别引自第一章参考文献中的第一和第二篇)中复制照片和图画。

我也要感谢牛津大学出版社科洛格尼办公室的编辑，特别是松克·阿德隆，感谢他们在本书的准备期间所给予的不断的帮助和鼓励。

卡罗·切尔奇纳尼

米兰

1997 年 9 月

导　论

不可逆过程的存在，人们在日常生活中都已熟知：人们在时间中不能回到过去。不仅生命体如此，我们通常接触的宏观物体也同样如此。当一部电影倒着放映时，人人都会哑然失笑，这不仅仅是因为片中的人都在倒着走。设想一部电影表现的是一只咖啡杯从桌上掉下，摔成碎片，并把杯中的东西撒在地板上，然后想象：当电影倒着放映时，你会看到些什么？我不想详述这个事例，因为在第五章中，会详细引述一个要回溯到 1874 年，且起因于威廉·汤姆孙爵士（开尔文勋爵）的类似的例子。

奇异的事实，是物理学的所有基本定律对于时间反演都是对称的。杯子重新由碎片组合起来，重新收集起地上的咖啡，并重新跳回到桌面上，这些都并不违反任何力学规律。

第一个给这种悖谬以令人信服的说明的人，是一位奥地利物理学家，路德维希·玻尔兹曼。玻尔兹曼 1844 年出生于维也纳，1906 年

于杜伊诺自杀身亡。他是物质的原子理论发展中的主要人物。他的名望将永远与其对科学的两个基本贡献相联系：对于数学上被很好地定义为对原子的“无序”的测量的熵这一概念的解释，和被恰当地称之为玻尔兹曼方程的那个方程。这个方程描述了由分子组成的气体的统计性质，从历史的角度看，这也是人们所写出的第一个支配概率在时间中的演化的方程。

由这一方程，玻尔兹曼就能推导出宏观现象的不可逆性。正是在以我们日常生活中观察到的客体为一方与以分子为另一方之间的尺度上的差异，通过概率定律说明了这种不可逆性。事实上，极大量分子的集合在动力学上有着令人难以置信的大量相互作用(碰撞)，它们发生于极小的距离(比如说，百万分之一毫米)。有着极大量的可能的相互作用结果(彼此间只有不可觉察的差异)描述咖啡杯的跌落和摔碎，而实质上只有一个结果描述相反的过程(其中任何一个不可觉察的差异将改变整个现象的展现)。我们从未观察到某种奇异现象，并非是由于它们不可能(即为某种物理学规律所禁止)，而只是因为它们是极端不可几的。

在物理学中，当玻尔兹曼开始其科学生涯时，对我们所观察不到的某些物理现象，常被归因于它们的不可能性，它们为热力学第二定律所禁止。而今天，追寻玻尔兹曼，我们认为这条原理所表明的，只是这些事件的极端的不可几。

一个宏观状态的概率的热力学量度，由上面提及的变量熵来描述，这个变量熵通过一个由玻尔兹曼发现的关系与微观状态相关联。这个写在他在维也纳的墓碑上的关系式，不应与上面提及的玻尔兹曼方程相混淆。如不用概率描述，人们也可把它表述为分子的无序程度的量度，因为(对一个给定的宏观态)与其等价的无序状态数量极多，其中之一发生的概率自然极高。

玻尔兹曼的理论告诉我们：宇宙的熵，即原子层次上的无序总是趋于增加的。

我们注意到对于热力学第二定律的深刻理解，与我们对于生命是如何可能的理解相关。我们的新陈代谢(来自于希腊文 μεταβάλλειν)，我们与外界的交换，通常被理解为(粗略说来，也的确是)物质交换。随后人们会想到能量(著名的卡路里，即热量)。事实上，对一个正在发育的孩子，或一个正在发胖的成年人，物质的交换是重要的，能量交换也是重要的，它使我们能够行走，从事其他体力活动(例如吃这一活动本身和消化)。但我们交换的是什么来保证我们的生存？不是能量，它(经常几乎是同时)消耗在工作或劳动中了，而是熵。更精确地说，是负熵。换言之，我们摆脱掉熵，以保持自身处于良好的有序状态(即处于良好的健康状态)。这些负熵又来自何方呢？来自食物，即来自动物和植物(为简单起见，我们排除了药物和人工生产的食物，其中的秩序显然是生产过程中引入的)。那么食物中的负熵又从何而来呢？如果这儿的食物是肉和鱼，则负熵来自其他食物。但最后，我们总会归于植物。而植物的负熵又从何而来？答案是：来自太阳，通过光合作用(这是植物“吃”的方式)。

太阳这一高温浓缩能源，辐射出为植物所利用的低熵光线。玻尔兹曼在1886年5月29日皇家科学院正式会议的致词中，以下述方式描述了这一重要过程：

> “这样，在太阳与地球之间……能量完全不是按照概率来分布的。因此，生命体普遍的生存竞争并非对于原材料的竞争，对于有机体，这些原材料是空气、水和土壤，所有这些都是充分地可获取的；也不是对于能量的竞争，它们以热的形式丰富地存在于任何物体中(尽管不幸是不可转换的)；而是对于熵的竞争，这种熵通过从炎热的太阳到寒冷的地球的能量转换而成为可获取的。为了尽可能地利用这种转换，植物伸展开它们无边的叶面，以迫使太阳的能量在降低到地球的温度之前，能从事某些化

学合成……这种化学加工的产物构成了动物界竞争的对象。”

然而，人们或许会说，如果熵在宇宙中持续增加，那么在作为宇宙自身起始的大爆炸的瞬间，熵值必定非常低。事情看来的确如此。当宇宙还是一个很小的原始火球时，有序程度肯定非常高，而熵则非常低。罗杰·彭罗斯(见《皇帝新脑》，牛津大学出版社，1989年)估计这么一种有序态的概率为10^{-123}，即一个其数字为1后面跟着123个0的数的倒数！

每当我们把微观的描述与任何我们用肉眼和日常实验观察到的东西相联系，玻尔兹曼的思想都构成了我们理解宇宙的基础。但这儿仍然有着一个令人吃惊的混乱，即使是在科学家中也是这样。这就是关于这些思想的严格性。这一混乱无疑是由于玻尔兹曼观点的原创性(也由于他早期论文中的某些含糊的表述)，它使得即使到今天，为他的同时代人所提出的那些异议依然存在。这些异议事实上并没有很好的理由，它们产生于对于玻尔兹曼的表述的误解。现在，我们已拥有严格的数学定理，以证明玻尔兹曼观点的含义及其精确性。

当我们像玻尔兹曼那样深入地研究问题，我们就会认识到，对于支配着我们的世界观念的微观方面的物理学基本定律的理解，与理解日常经验的重要方面迥然不同。物质的基本组分的尺度是如此之小，使得我们无法从它直接得出在宏观层次上的世界图景。存在着不同的结构等级，在每一层次上都产生出新的概念。即使真实的世界由原子(或甚至于更小的粒子)组成，要用这些基本组分来描述世界上的事件也是太困难了。我们所能做的，是在不同层次之间建立起桥梁，以便形成了一个一致的图景；而玻尔兹曼的全部工作，正是这种过程中的一个杰作，即如何从原子开始，构造一个说明日常生活的描述。因此，如果玻尔兹曼方程今天被应用于实用性目的，就毫不奇怪了。当一个航天工程师在研究航天飞机的重返大气层时，他必须考虑到，在飞机的设计中通常所适用的是把空气作为连续介质，但

在更高的稀薄的大气中就不再适用了，而必须运用玻尔兹曼方程所提供的原子式的描述。如果我们要研究污染空气的非常微小的粒子的运动，由于这些烟雾粒子极小的尺度，我们必须再次抛弃把空气作为连续体的传统模型，而采用玻尔兹曼方程。

适当修改后的这一方程，已被运用于研究现代技术的其他领域中的重要现象，从中子在核裂变反应堆中的运动，到带电粒子在未来的聚变反应堆中的运动；从燃烧室中产生的辐射，到今天应用于电子设备，尤其是计算机中的亚微米级集成电路块中载荷子的运动。这一思想同样也传播到了其他处理并非如此之小的粒子的领域，例如团粒材料和公路交通。

玻尔兹曼会非常高兴地看到这些技术应用。他对于技术非常感兴趣(特别是他预言了飞机比可操纵的飞艇更优越)，并不止一次地对技术在科学发展中的作用不吝颂词，大加赞赏，在第十二章的两段引文中可以看到这一点。

玻尔兹曼也因其善于将科学通俗化的能力而著称。他的《通俗文集》一书，以一种朴素的风格和充满幽默感的火花，连同他对于他那个时代的生活素描一起，将他关于科学本性的一般观念以及他关于理论物理的特殊观念呈现在我们面前。从这一角度来看，令人难忘的是他对于1905年前往加利福尼亚之旅的长文，冠之以“一个德国教授的黄金国之旅”的标题。在这篇文章里，除了其他事情外，他讲述了他在寻找葡萄酒时是多么地困难：他说，当你要问人，在哪儿能找到葡萄酒时所产生的尴尬，就像在欧洲国家要问在哪儿能找到那种其座右铭为“你给我钱，我就给你爱”的姑娘时一样。在一封给他的助手斯蒂芬·迈尔的信中，他更简洁地说：“这儿的人们把他们的葡萄酒藏起来，几乎就像中学生藏他的雪茄烟一样。这就是他们所称的自由。”

这些演讲中虽不那么幽默、但却更为深刻的部分是他的思想。正是他的思想，以及他对于理论物理学的贡献，引起了维也纳学派的

成员，以及诸如维特根斯坦这样的思想家的关注。如我们将看到的，他反对“唯心论哲学”；有趣的是，列宁曾带着赞赏的口吻引用了玻尔兹曼的话，他因此在前苏联成为科学唯物主义的英雄。本书第十章将介绍玻尔兹曼的哲学观点。

当玻尔兹曼致力于使他的理论为当时的人们所理解时，遇到了很多困难，这一问题将在本书中反复出现。然而，他的观点终于逐步地得到确认，并对20世纪物理学的发展，特别是爱因斯坦和普朗克的工作，产生了很大的影响。

玻尔兹曼在许多方面都是现代物理学和现代知识观的先驱。按照这种知识观，那些看上去无关的、独立的、自主的、不同的一切事物，事实上都以一种难以把握的方式微妙地相关联。而正是这种关联方式，使得还原论既是正确的，同时也是错误的；也正是这种关联方式，突出了从物理学到文学、从化学到心理分析的每一种知识形式的重要性，即使它们都为一个单一视界的框架所约束，而这个框架，则基于一种独特的、包括玻尔兹曼本人在内的许多伟大人物都曾对它的创造作出过贡献的文化。我们需要这种文化来理解我们所生活的这个复杂的世界，以避免与幽灵和幻觉战斗，并为我们的子孙后代创造一个更美好的生活。

目录

序　　罗杰·彭罗斯 …… 1
自　序 …… 1
导　论 …… 1

第一章　路德维希·玻尔兹曼小传 …… 1
第二章　玻尔兹曼之前的物理学 …… 64
第三章　玻尔兹曼之前的分子运动论 …… 93
第四章　玻尔兹曼方程 …… 113
第五章　时间不可逆性与 H 定理 …… 127
第六章　玻尔兹曼关系和熵的统计说明 …… 161
第七章　玻尔兹曼、吉布斯与平衡态统计力学 …… 181
第八章　多原子分子问题 …… 207
第九章　玻尔兹曼对其他物理学分支的贡献 …… 217
第十章　玻尔兹曼的哲学思想 …… 231
第十一章　玻尔兹曼与他的同时代人 …… 277
第十二章　玻尔兹曼思想对于 20 世纪科学技术的影响 …… 301

后　记 …… 318
年　表 …… 320
一个德国教授的黄金国之旅
　　路德维希·玻尔兹曼 …… 326
参考文献 …… 356

第一章

路德维希·玻尔兹曼小传

青年时代和欢乐岁月

我们不知道为什么戈特弗里德·路德维希·玻尔兹曼(1770年生于柏林)在他的早年要移居维也纳，成为一个八音盒的制造者。他在那儿结婚，并有了一个儿子路德维希·乔治。乔治长大后成为一个税务官，并于1837年与萨尔茨堡一位商人的女儿玛丽亚·保恩法因德成婚。乔治与玛丽亚的长子路德维希·爱德华·玻尔兹曼1844年2月20日出生于维也纳。他将要成为一位著名的物理学家。他诞生的那一夜，正是基督教中从忏悔日向圣灰星期三的过渡，玻尔兹曼因此常说他诞生的日子说明了为什么他的性情会突然由极度高兴变得非常沮丧。两年后，第二个孩子阿尔伯特出生了，他在中学时死于肺炎。路德维希还有个妹妹，叫海德维希。三个

孩子受的都是他们母亲所信奉的罗马天主教的洗礼和熏陶，而他们父系祖先信奉的却是新教。

玻尔兹曼的初级教育是由一位私人教师在他父母家进行的。他父亲的薪水不高，但却因他母亲的幸运而补偿。事实上她来自一个相当富裕的家庭(在萨尔茨堡，迄今仍有一条保恩法因德街道，甚至还有一条保恩法因德大街)。他父亲不得不移居韦尔斯，其后又到林茨，玻尔兹曼在这儿上了地方上的预科学校。他在班上总是最杰出的，并显示出对于数学和科学的极大热情。后来，玻尔兹曼把自己生命的最后岁月中深受视力恶化之苦的原因，归于这一阶段漫漫长夜里的秉烛夜读。在林茨，他还师从安东·布鲁克纳学钢琴。但他的钢琴课突然地结束了，原因是这位未来的科学家的母亲对这位教师把他的湿雨衣放到床上这件事颇有微词。尽管如此，玻尔兹曼却终其一身，与钢琴相伴，增进技艺，并在以后的岁月里，经常与其拉提琴的儿子阿图尔·路德维希一起合奏。

当玻尔兹曼15岁时，他的父亲死于肺结核。这一悲剧在这孩子身上留下了难以消除的痕迹。19岁那年，这位未来的物理学家进入维也纳大学学习数学和物理学。物理学院于14年前，由著名的多普勒效应的发现者克里斯蒂安·多普勒(1803～1854)所建立。由于这一效应，声音的频率随着声源对于听声者的相对运动而变化，正如日常生活中当一辆车迎面而来又呼啸而去时我们所经历的音程的变化一样。一个同样为多普勒所阐明的类似的效应发生于光学中，但是因为相对论效应而更为复杂。该学院在维也纳大学里享有相当大的自主性。安德烈亚斯·冯·埃廷斯豪森刚刚把院长的位置交给了约瑟夫·斯忒藩(1835～1893)，后者当时还非常年轻，后来由于对辐射热和温度之间关系的经验发现而名扬于世。斯忒藩是当时少数几位接受了由场来传递局域作用的观念的非英国籍物理学家之一，这种全新的电磁理论研究进展是由麦克斯韦在法拉第的洞见和实验的基础上发展起来的(见下章)。玻尔兹曼特别赞赏斯忒藩与他的学生的密切联

系。关于这一点，许多年以后，他在斯忒藩的悼词中有一段常常被引用的话："当我与斯忒藩的关系开始密切后，当时我还是一个大学生，斯忒藩做的第一件事，就是递给我一份麦克斯韦的文章，并且鉴于我那时还一个英文词也不认识，他还给了我一本英文语法书，虽然我当时已有了一本父亲送的英文辞典。"

入学三年以后，玻尔兹曼获得了他的哲学博士学位(他已发表了两篇论文)。人们或许会问他论文的题目是什么，答案非常简单：在1872～1873年以前，维也纳大学的哲学研究的全部课程中没有论文写作。

在其后(1867年)的岁月里，玻尔兹曼成为一名助教授。他也成了约瑟夫·洛喜密脱(1821～1895)的朋友，后者当时已在物理学院工作。这个学院当时只是在埃德贝格大街的一幢房子里有个小实验室，但它的成员们却都很有想法。关于这个小小的团体，玻尔兹曼后来写道：

> 埃德贝格在我的毕生中都将成为一种真正的和令人感奋的实验工作的象征。当我成功地把自己生命的一部分投入到格拉茨的物理学院时，我曾经开玩笑地称之为"小埃德贝格"。当然，我这么称呼它并不是说它空间上狭窄，因为实际上它有斯忒藩的学院两个那么大；但我没能同样成功地宏扬埃德贝格的精神。即使在慕尼黑，当年轻的博士们来对我说他们不知道去做些什么时，我总是想："这与我们在埃德贝格时是多么的不同！今天有了漂亮的实验仪器，人们在寻求如何使用它的想法。我们(在埃德贝格)却是充满了想法，却苦于缺乏仪器。"

1868年，玻尔兹曼被授予讲课权。而当1869年，年仅25岁的他获得了格拉茨大学数学物理学教授的教席。格拉茨是施蒂里亚州的主要城市和今日奥地利的第二大城市，由于占据穆尔河上的极好地位，具有大量的花园，处在风景怡人的山冈上而有"绿色城市"的美称。格拉茨大学当时正经历着快速的发展，以期达到欧洲最重要的

大学的水准。

在格拉茨，玻尔兹曼成了仅仅稍许早些抵达的学院院长奥古斯特·托耶普勒的同事。托耶普勒是一位非常热诚的人，在行政管理方面也很有活力。他很快成为玻尔兹曼的良师益友。在抵达格拉茨后，托耶普勒计划致力于修建新的建筑物(很快就出了名)、购置新的仪器、筹集更多的研究基金。因此，对年轻的物理学家来说，他的抵达，标志着一个充满学术活力的时期的开始。而这一时期的高潮，则是1872年发表于维也纳皇家科学院学刊上的那篇论文，尽管从此文的标题《关于分子气体热平衡态的进一步研究》中，人们很难得其要领。正是在这篇文章中，玻尔兹曼提出了以他的名字命名的著名方程。虽然这一问题会在后面的章节，尤其是第四章和第五章中详加说明，但似乎在这儿就他的这一主要贡献多说几句是适当的，玻尔兹曼的名字将永远与这一成就相联系。这一方程描述了由分子组成的气体的统计性质，而从历史的角度看，它是人们所发现的支配概率的随时间变化过程的第一个方程。

图1.1　24岁时的路德维希·玻尔兹曼，当时在维也纳当讲师。(承蒙迪特尔·弗拉姆教授同意)

在同一篇论文中，玻尔兹曼还推导出了宏观现象的不可逆性的一个证明。正是在以我们日常生活中观察到的对象为一方，以分子为另一方之间的尺度上的差异，说明了这一通过概率定律表现出来的不可逆性。它表明，在宏观尺度的单位体积中包含的大数量分子，经历着其数量大到令人难以置信的程度的碰撞，而这些碰撞发生的距离，则又小到令人难以置信的程度，大约在一毫米的百万分之一的数量级上。这些描述着自然界中实际过程的相互作用的可能结果的数量极其巨大，但这些结果彼此之间的差异却是难以察觉的。对于起始状态的细节，例如几个分子的位置或速度的微小修正，只要它们没有影响到我们的总体印象，在我们对于现象的知觉中将不会有什么大的不同。与之相反，描述一个由我们的一系列感觉在时间中的回溯所构成的相反过程的，只有一个可能的结果；对于起始状态(即带有**反向速度**的先前的最终状态)的每个不可觉察的差异，都将剧烈地改变我们的整个感觉系列，从而改变我们对于现象的知觉。我们绝不可能观察到某种奇异的事件，不是因为他们是不可能的(即为某些物理学定律所禁戒)，而只不过是因为它们是概率极其小的。或许可以用下述(很不恰当的)例子来解说这一情形：如果我们把大量黑色的和白色的粉末放进一个盒子，实际上是把黑色的和白色的分别放在盒子的右边和左边，并假设它们没有装得太满，然后如果我们以各种方式摇晃这个盒子，过了一会儿后，我们将得到两种粉末充分混合的灰色混合物。而另一方面，如果我们从灰色混合物出发，摇晃上几天，甚至于几年，也不可能把两种粉末再分开。这里并不存在力学上的不可能性，而只是事实上比之于粉末在其中极为有序的极小的位形数目，灰色粉末的出现占据着多得无可比拟的位置。因此这是个概率问题。气体的基本构成中没有颜色，但却有着位置和速度；摇晃粉末的行为则为分子间的碰撞所取代，从而把它们带进更有可能的状态。玻尔兹曼写出了允许我们计算在大多数情形中一个具有某一速率的分子处于某一位置的概率随时间变化的方程。起初，他并没有

意识到自己的成就，他认为自己仍然是在力学的疆界内，正在计算实际的分子数，而没有意识到涉及了多少概率论。确实，他在论文的引言中说到他正在运用统计和概率，但他也说到“相信热的力学理论因此会由于概率论原理的使用而为不确定性所苦恼将是错误的，……这只会加倍地要求我们以最大的精确性去得出结论”。今天，任何概率理论的运用确实要涉及某种不确定性，正如任何概率定律的原型，即所谓的“大数定律”表明的：人们只能计算平均值，而对于这些平均数总会有随机分布的偏差。有人或许会推测，说玻尔兹曼从一开始就很清楚地知道这一点。但看来他也认为他已得到一个除了那些涨落外，没有例外地可由力学方程中得出的结果。事实上，他已得到了一个具有大得不可思议的概率的结果，但他的推导中的许多(主要相关于起始数据的)细微之处，他在1872年看来还没有意识到。正如我们将会看到的，朋友和对手的反对，迫使他重塑他的思想，并创造出一种新的看法。这是一种全新的看法，它开启了物理学中一个新的时代。在第五章中，将对这一基本点进行更为细致的讨论。

在那个时代的物理学中，人们没能目击到某些现象，就认为这些现象是不可能的，即它们为热力学第二定律所禁戒。而今天，按照玻尔兹曼的说法，我们认为这一原理所表明的不过是这些事件的极端不可几性。

一个宏观状态的概率水准的热力学量度，由一个称作熵的变量来描述；如我们在下一章将看到的，它突现于复杂的热力学计算中。而热力学与力学之间的联系，则通过气体运动论得以建立，我们在第五章和以后的章节中会看到这点。当蒸汽机被普遍运用，从而热与基于伽利略和牛顿的工作而为许多科学家所确立的自然界的力学概念相关联时，这种对热力学与力学联系的研究就尤显必要。

在这些年月里，除了他的理论成就外，玻尔兹曼还进行着关于电容率与折射率之间关系的实验研究，结果发表于1873年。

在他为约瑟夫·洛喜密脱所写的讣告(写于1895年)中，玻尔兹

曼提到了下述有关他早年研究的轶事：

> 当时，我正考虑用硫化晶体的球来做一些实验。由于没有人能磨出这样的球，洛喜密脱提出，我们在维也纳国家剧院排队买票时一起来做。他还指望我们用二硫化碳能成功地迫使那些排队的人离开。

应当感谢托耶普勒所得到的基金，玻尔兹曼能得以短暂地离去，去海德堡与著名的化学家罗伯特·威廉·冯·本生(1811～1899)、数学家莱奥·柯尼希斯伯格(1837～1921)一起工作，并到柏林与古斯塔夫·基尔霍夫(1824～1887)和赫尔曼·路德维希·费迪南·冯·亥姆霍茨(1821～1894)一起工作。

他在柏林的同事，都是当时最负盛名的物理学家，其中基尔霍夫的名声尤得自于他把联系电流与电势差的欧姆定律拓展到三维物体(对比于一维导线)，得自于他识别出欧姆的静电力就是静电学的电势，得自于他为人们所赞颂的关于沿着电报线和三维导体的电传导的研究，得自于他所发展的关于理想流体与导电体之间的数学类推，也得自于他关于稳恒电路网络中的电路定律。他还研究过辐射热，引入了发射强度和吸收系数的概念，证明对于任何物质，它们的比率如何等于同等温度下所谓的黑体的发射强度。此外，他还研究过力学基础；他的观点是物理学仅描述事实，因此力并无深层的含义：它们不过如牛顿所发现的那样，是一种能对运动定律给出更简单描述的工具。

亥姆霍茨则有着非常广泛的兴趣，其范围从数学、物理学到美学，从生理学到心理学。他生于波茨坦，是一位文科教授的儿子。在1848年底以前，他是一位军医，然后被任命为柏林的解剖学博物馆助理，以及艺术科学院的解剖学教师。其后的岁月里，他去柯尼斯堡(今天的加里宁格勒)当生理学教授。1856年，他成为波恩大学

解剖学和生理学教授，1859 年成为海德堡大学生理学教授，1871 年为柏林大学自然哲学教授。

还是在他的军医生涯中，亥姆霍茨发表了为他赢得了最高声誉的《论力的守恒》一文，其中“力”在当时非常普遍地有着“能量”的意思。无疑，这篇论文对于理解这一基本的物理学原理的作用和意义，给予了极大的推动，尤其是他澄清了为确保能量的守恒所必须作出的关于力学系统的假定。其结果，能量守恒原理成为在一个清晰的框架里组织事实和理论的可靠指南。

其后，亥姆霍茨转向了生理光学，并发明了眼膜曲率镜。此外，他研究了生理声学中音的感觉，并在以后把它应用于音乐仪器的理论中。他还就流体力学中的涡旋运动写作过非常重要的文章，并下了很大的功夫，对不同作者对于电磁理论的贡献作了综合性的描述，以便于对他们加以比较。

在 1872 年 1 月，玻尔兹曼给他的母亲写信：

> 昨天，我在柏林物理学会发表演讲。你可以想象我是如何尽我所能地想不让我们的祖国丢脸。因此，在前些天，我的脑海里充满了各种符号……顺便说一句，这种努力并不必要，因为大多数听众实际上听不懂我所说的。然而，亥姆霍茨也作了演讲，于是一场有趣的讨论在我们两人之间展开。因为你知道我是多么地喜欢科学讨论，因此你可以想象我的快乐。特别是由于平常亥姆霍茨是不那么容易接触到的。尽管他总是就在旁边的实验室工作，但在此之前，我还没有机会与他畅谈。

从科学的观点看，玻尔兹曼最有可能请教意见的人，是亥姆霍茨。但是这位普鲁士的秘密顾问的冷漠令他心寒。有一次玻尔兹曼曾说过：“在有些问题上，我所能与之讨论的只有一个人，就是亥姆霍茨，但是他太遥远了。”

1873 年，玻尔兹曼未能抵御住诱惑，接受了维也纳大学数学教授的职位。到维也纳当一个教授，在奥地利被看作是——迄今也依然是——一个人学术生涯中所可能走到的最高一级，尽管它常常也等于失去了个人研究中的平和与专心。当然，玻尔兹曼可能还有着另外的动机，例如希望做一些实验方面的工作，而在这方面并没有令他失望。

为了用一个新的数学教席来聘用作为物理学家的玻尔兹曼，维也纳大学校方的理由是，尽管玻尔兹曼的研究起始于物理学，它们也是“优秀的数学成就，包括解决了分析力学、尤其是概率演算中的一些非常困难的问题”。对于他的“确实是一位数学天才”的评价，是依据他应用高等分析于热学理论中的成就而作出的。

1875 年，玻尔兹曼的基本方程遇到了来自他的朋友洛喜密脱的反对。这一反对意见（“可逆佯谬”）和玻尔兹曼的回答将在第五章详细讨论。

图 1.2　31 岁时的路德维希 · 玻尔兹曼，当时他在维也纳当教授，正致力于解释洛喜密脱佯谬。（承蒙迪特尔 · 弗拉姆教授同意）

在离开格拉茨以前，玻尔兹曼遇到了他未来的妻子亨丽埃特·冯·艾根特勒，一位有着亚麻色长发和蓝色眼睛的姑娘。她比他年轻十岁，作为一位孤儿，正生活在作曲家威廉·金茨尔的父母在格拉茨以南的施塔恩茨的家中。她是一位教师，在邂逅路德维希·玻尔兹曼之后，她决定学习数学。如果说格拉茨大学哲学学院主任希策耳为这姑娘竟愿意学习数学和物理而感到奇怪，这倒没有什么。在他眼里，一位妇女的命运就是烹调食物和收拾屋子，他认为这是稳定的家庭生活的惟一基础。在第一个学期，因为当时尚无法律禁止妇女上大学，她被允许只听讲课。但第二个学期开始时，学院已通过了一项拒绝接纳女生的规定。于是，这位姑娘向原为她父亲(他刚刚去世不久)在格拉茨法庭的同事的公共教育部长递交了一份请愿书。这位部长将她从这一为学院投票通过的规定中豁免，但在下一个学期，这个问题又冒了出来。最终，在她与玻尔兹曼订婚后，这位年轻的女士终于决定听从希策耳教授的建议，在她父亲生前的另一位极好的朋友、格拉茨市市长的家中学习烹调。

最近，玻尔兹曼与他的未婚妻在订婚期间的来往信件，由他们的孙子迪特尔·弗拉姆教授编辑，以《令人尊敬的教授，亲爱的路易：路德维希·玻尔兹曼与亨丽埃特·冯·艾根特勒通信录》为名成书发表。玻尔兹曼生活中和个性中的一些有趣的方面从这些信件中显露出来。从书的标题，我们已可看出他们亲密程度的增长，亨丽埃特用“路易”取代了“路德维希”，而反过来，亨丽埃特的称呼则由先前“尊敬的小姐”，成了仅仅是“耶蒂”。这种称呼的变化发生在11月30日到12月6日的这一周中——有带有这些日期的两封信件为证。

玻尔兹曼于1875年9月27日写了一封求婚信给亨丽埃特，他认为这类事还是以书面处理为好。从这封信中，我们了解到即使在这些日子里，通货膨胀还是造成了问题。在“作为数学家，你不会发现那些支配着世界的数字有多少诗意”这句抱歉的句子之后，玻尔兹

曼描述他的财务问题如下："去年，我的年薪是5 400弗罗林。这笔钱足以支持我们的生存，但如果考虑到维也纳物价的飞涨，它就不足以供给你许多消遣和娱乐了。"

玻尔兹曼继续描述着他对于婚姻的看法："尽管对一位其惟一的资本是其工作的丈夫来说，严格的节俭和照顾家庭是重要的；但在我看来，如果(一位妻子)对于丈夫的努力既不理解，也没有热情，只是他的侍女，而不是随之共同奋斗的伴侣，那么也不可能有永恒的爱。"

从另一封由亨丽埃特写于11月25日的信中，我们知道玻尔兹曼已经被提供了一个在弗赖堡的职位。在声明了这件事对她来说无足轻重("因为无论如何，我只想要你")之后，亨丽埃特分析了这一调动的有利之处和不利方面，因为玻尔兹曼在征求她的意见。在有利方面，她提到(与在维也纳相比)专业管理上所花的时间会较少，这样他就能有更多的时间用于他的研究和家庭。其次，有可能当上物理学院的院长，对于这一点，玻尔兹曼的态度不太清楚，而亨丽埃特认为这个职务会让他高兴。不利条件是薪金(只相当于他在维也纳收入的一半，在维也纳的收入除了薪金外，还有三种附加的津贴)。她怀疑在弗赖堡是否还有这些津贴，但不管怎么样，较低的收入能由免费的住房和较低的物价中得到补偿。另一个有利之处，则是弗赖堡有着靠近黑森林和康斯坦丝湖的优美环境。

玻尔兹曼身材不高，但体格健壮。他有着卷曲的头发和蓝色的眼睛。根据他们的孙子迪特尔·弗拉姆(这本传记的许多私密性细节都来自于他)的说法，玻尔兹曼的未婚妻经常把他称为"胖胖的甜心"。每当他不得不离开她时，心地柔弱的玻尔兹曼总是泪水难抑；而每当有人求助时，他也总是不愿回绝。如果一位经济状况不好的学生未能通过考试，他就会强烈地感到自己有责任。在他生命的最后岁月里，学生们在他那儿都通过了考试。他为人处事非常讲求良心，但也正因为如此，那些要比在格拉茨沉重得多的行政工作，也就成了他极大的负担，并几乎成为他的烦恼。

在格拉茨，物理学院刚刚建立，并正致力于建设成一个理想的探索当时物理学最前沿的高质量的研究中心。从来到格拉茨那天起，奥古斯特·托耶普勒就抱怨物理系里“大多数都是过了时的破烂货”，并已得到政府10万弗罗林的许诺，以盖一幢新的学院大楼，并在1873～1876年间，购买了价值28 000弗罗林的仪器。

然而，在1876年写给玻尔兹曼的一封信中，这位具有着普通物理和实验物理教席、并是这一优越职位的创造者的托耶普勒，依然为缺乏资金而痛惜。在为这个学院付出了大量精力(以及他的健康，他已从学院的楼上搬到了地下室)后，托耶普勒相信格拉茨需要一位新的物理学家，因而在同年夏天离开格拉茨赴德累斯顿。由于种种原因，托耶普勒在格拉茨留下的教席对玻尔兹曼有着极大的吸引力：他将能继承托耶普勒的实验室，能在这儿讲授物理学而不是数学，在格拉茨，行政管理的负担也要比在维也纳轻。此外，我们不要忘记玻尔兹曼正准备结婚，但在维也纳他却找不到一套公寓。最后，但并非最不重要的是，他未来的妻子是格拉茨人。

即使是像玻尔兹曼这样的人，要获得这个格拉茨的职位也并不容易。在他的竞争对手中，也有着恩斯特·马赫(1838～1916)，后者自1864年至1867年已在这儿有过一个数学的教席。马赫因为他杰出的论著《力学史评》而非常著名，他的这篇论著对于整整一代科学家都影响极大，其中最突出和知名的，就是爱因斯坦的例子；它对科学哲学的发展也很有影响。这篇发表于1883年的论著的主旨是：那种当时占压倒优势的传统观点，即认为力学是物理学所有分支的基石，并致力于对所有物理现象加以力学说明的观点，本质上是一种偏见。为了证明他的论点，他应用了所有可获得的工具，从心理学到进化论生物学，从他对旧的教科书的详尽知识，到在分析概念结构方面非凡精细的能力。除了类似于基尔霍夫和亥姆霍茨的对质量和力等概念的基本分析外，他强调科学的主要特性是思维经济；科学尽力地如此来表述它的原理，即用少量的概念和命题，来浓缩由实验观察

结果中积累而来的知识。因此，他反对那些超越了事实的实验图像或模型。正因为这个原因，他否认原子的存在。如我们在第10章中会看到的，玻尔兹曼的哲学在许多细节方面与此不同，他非常赞成用图像作为实在模型，来帮助我们做出发现。而经济的表述在他看来，是科学中某些垂死分支的丧钟。

1876年，马赫当时在布拉格，也想回到格拉茨。因此，对这对正等待结婚的年轻人，随后是一段焦虑的日子。婚期几乎已确定在7月17日，但他们还不知道能否在维也纳，或是格拉茨找到一处房子。似乎是为了增添他们的烦恼，他们的蜜月也有要泡汤的危险，因为需要与部里探讨在格拉茨的职位。关于这种令人不快的情形，玻尔兹曼写道："我恨这种持续的秘密的战斗；我对于积分(integral)，要比对这种搞诡计(intrigue)要懂得多得多(此处为一双关语，因为这两个词的发音相近——译者注)。"到距离婚期只有5天时，部里还迟迟未作决定，但这对未婚夫妇却已决定：无论如何也要结婚。最终，渴望已久的决定也终于来了。

玻尔兹曼在格拉茨度过了14年。除了最后两年，如我们会看到的，他们在那儿的生活是幸福的。他们有了两个儿子，路德维希·胡戈(1878～1889)和阿图尔(1881～1952)，两个女儿，亨丽埃特(1880～1945)和伊达(1884～1910)。第三个女儿伊尔莎(1891～1966)是在他们家离开格拉茨后出生的。惟一不幸的事件，是玻尔兹曼的母亲于1885年去世。这些幸福的日子与玻尔兹曼生活中随后的事件恰成对照，后者是以无法安宁和渴望搬迁和变动为标志的。

在这些年月里，玻尔兹曼在为学术共同体及政府所敬重和推崇的同时，也发展了他的关于自然的统计概念。为了帮助他，专门设置了一个类似于如今的副教授的职位，以提供给阿图尔·冯·埃廷斯豪森(1850～1932)，他是我们前面提过的安德烈亚斯的侄子，由他来实际负责所有的行政事务。他也是由他与共同发现者的名字来命名的热力学效应——能斯特-埃廷斯豪森效应(一种电流-热磁效应)的发现者之一。

图 1.3　路德维希 · 玻尔兹曼与他全家摄于 1886 年。
孩子们是(从左至右)：亨丽埃特、伊达、路德维希、阿图尔。
(承蒙伊尔莎 · 法佐尔-玻尔兹曼博士同意)

1878 年，玻尔兹曼当上了学院院长；1881 年，他成了政府顾问；到 1885 年，他成为皇家科学院成员；1887 年，就任格拉茨大学校长；并于 1889 年成为宫廷顾问；更不用说外国所授予的长长的一系列荣誉了。

除了他曾担任的托耶普勒的职位外，这里还有着另一个理论物理的教席，玻尔兹曼第一次在格拉茨工作时曾拥有这一席位。这个教席的正教授由海因里希 · 施特赖因茨担任。这是一位非常令人尊敬的和杰出的人，但他的名声被其著名的同事所遮掩了。他不是特别活跃，发表过数十篇关于不同论题的论文，还有一篇关于力学基础的专题文章，这篇文章曾一度非常著名，直到被我们前已提及的马赫的

论著胜过为止。玻尔兹曼与施特赖因茨一直相处得很好，并在他需要时总是倾力给予个人的和财力上的支持。

玻尔兹曼非常喜爱大自然。他习惯于长时间地散步，在散步时他总是十分幽默，向他的学生解释遇到的各种植物；这些散步，加上冬天的滑冰，也就构成了他年轻时很少的体育锻炼。因此，他在家里也安了一套体操器械，并坚持让孩子们使用它。尽管像学院里其他的科学家一样，他们家在物理学院里有一套公寓，玻尔兹曼却在靠近奥伯克罗斯巴赫的地方也买了一处能俯瞰施蒂里亚的很大的一片农场，与他的家人生活在乡村。他认识很多植物，有着一个植物标本室，还收藏有许多蝴蝶标本。这种对于大自然的热爱，也体现在他农村房舍的工作间的布置中，从那儿向外望去可看到优美的景色。他的邻居都是农民。他有一条阿尔萨提彦狗，它每天中午都从农场跑下来，等他从学院出来后，陪着它的主人一起去附近的一个酒吧。当玻尔兹曼午餐时，这条狗就躺在他的脚下。据说玻尔兹曼还亲自赶过一头刚买的牛在格拉茨的街上招摇过市，说这是在咨询了动物学的同事后所得到的最佳喝奶方式。

在此期间，玻尔兹曼曾被宫廷邀请去过几次。但是，或许是由于他的近视，他吃饭很慢。在正式场合，弗朗兹－约瑟夫皇帝很少碰自己的食物，而宫廷礼节不允许皇帝已结束用膳后，他的客人还继续进餐。我们的科学家当侍者那么快地端走他的盘子时非常失望，他几乎还来不及品尝这些精美的食物。但这显然并非他拒绝授予他的贵族头衔的原因。他曾经说过："我们的中产阶级的姓氏对于我的祖先来说已足矣，对于我的子孙们来说也同样如此。"

玻尔兹曼非常喜欢他的子女。这里我们可以讲一件关于他晚年生活中的轶事。他最年幼的女儿想要一个宠物猴，但他妻子不喜欢家里有任何动物。玻尔兹曼想出一个主意，答应给她买几只兔子，并在自己的藏书室里给它们安了一个笼子。女儿的卧室邻近他的书房，每天晚上，玻尔兹曼总要轻叩她的房门以示慈爱之情。

图 1.4　当玻尔兹曼在格拉茨大学当教授时，他与其家人居住的奥伯克罗斯巴赫农场。
（承蒙伊尔莎·法佐尔-玻尔兹曼博士同意）

我们已经提过，玻尔兹曼喜爱滑冰和散步。他的爱好还有游泳。他也喜欢与朋友同度夜晚，这种聚会总会持续到很晚。这些家中的招待会经常举办，客人中包括他的博士生。他喜欢交际，并且是一位在聚会中受欢迎的客人，因为他以他那不寻常的幽默感使每个人得到欢乐。在这些场合，他还常常写一些诙谐诗，其中的一首以“天堂里的贝多芬”为题，我们会在后面再说到它。

玻尔兹曼对于古典德国诗歌很有造诣，并很喜欢引用。他把自己的《通俗文集》一书题献给弗里德里希·席勒(1759～1805)，这位诗人的诗中充满了个性自由的精神，并决不把伦理与艺术二者分开。席勒是玻尔兹曼所喜爱的诗人，而在作曲家中，玻尔兹曼最喜爱贝多芬。他喜欢在李斯特的安排下，在钢琴上演奏贝多芬的交响曲。与朋友们和他的儿子阿图尔一起，他经常演奏室内乐。他也喜欢出席音乐会，并且是维也纳歌剧院的赞助人。

图 1.5　路德维希 · 玻尔兹曼的墓碑，上有被爱因斯坦称为玻尔兹曼原理的联系熵与概率的公式。
（承蒙迪特尔 · 弗拉姆教授同意）

在大学里，玻尔兹曼有着充裕的基金，广阔的空间，埃廷斯豪森的帮助，几位博士生和访问学者，各种实现他的实验兴趣的机会，这种兴趣或是来自他的理论问题，或是他自己的选择。即使是院长的职责也并不繁重，因为只要有可能，就可交给副院长去做。这是田园诗般的情境。玻尔兹曼也与当时最著名的物理学家们保持着联系：亨德里克 · 安东 · 洛伦兹(1853～1928)，他在基于玻尔兹曼方程而论证多原子情形的不可逆性时发现了一个错误，见第五章和第八章；亥姆霍茨，我们已介绍过他；威廉 · 奥斯瓦尔德(1853～1932)，见第十一章；以及麦克斯韦在剑桥卡文迪什实验室的继任者，约翰 · 威廉 · 斯特拉特(由继承而来的瑞利勋爵爵位，1842～1919)。尽管如此，写于这一时期的若干信件表明，他不知怎么地总觉得自己远离

了现代科学的中心，在那儿，他会享受到更多的联系和探讨。然而，正如他带着一定的满足而向托耶普勒所承认的，婚姻使人懒散，要超出他原来的预期。

或许正因为此，他的继任者利奥波德·普福德勒尽管满怀着对于玻尔兹曼的敬意，但仍然宣称他在物理学院的楼中发现的是一个猪圈。看来著名的科学家忙于他的研究，对作为大学教授的工作做得是太少了。

1877年，玻尔兹曼发表了他的论文《论热理论的概率基础》，他在其中表述了后来被爱因斯坦称为“玻尔兹曼原理”的思想；把熵解释为数学上被很好地确定的对原子的“无序”的量度，这个在他1872年的工作中就曾出现过的想法，在这儿被拓展成为一种普遍的陈述。如我们已经提到过的，玻尔兹曼之前的物理学，有一门叫作热力学的学科，在对原子无序运动的效应的研究中，甚至就没有提到物质的原子结构。有一个相当神秘的量，即前面提到的熵，在任何不被允许的过程中起着重要的作用。感谢玻尔兹曼的研究，它表明熵不是别的，正是一个宏观态的概率水准的量度，而这种量度可以通过一个由玻尔兹曼确立的关系(不要与我们前面暗示过的玻尔兹曼方程相混淆)，与描述分子世界的微观状态的概率水准相关联。正是这个关系，被镌刻在了他在维也纳的墓碑上。人们可以不去谈论概率，而是谈论原子无序的量度，因为对一个宏观态而言，等价的无序状态非常多，而它们其中之一发生的概率就非常高。我们将在第六章详细讨论这篇论文。

1884年，玻尔兹曼得知了意大利物理学家阿道夫·巴托利关于辐射压力的工作，这刺激他对斯忒藩的热辐射定律(依据这一定律，由一热源辐射出的能量，正比于绝对温度的四次方)给出了一个卓越的理论推演。在同一年，他也写了一篇基础性的论文，但却一般不为大多数物理学家所知晓，他们由二手的报道被导向错误的信念，认为玻尔兹曼所处理的仅仅是理想气体。而这篇论文指出，他也考虑

了具有不可忽略的势能的相互作用的分子，因此，如我们在第七章将会看到的，是他而不是乔赛亚·威拉德·吉布斯(1839～1903)，应被看作是平衡态统计力学和系综方法的奠基人。在1887年的另一篇文章中，玻尔兹曼讨论了热力学第二定律的力学类似。

1886年，赫兹对于麦克斯韦所预言的电磁波与光等价的实验证实，给玻尔兹曼留下了深深的印象，他花费了相当大的努力去重做赫兹的实验。这些都载入了他离开格拉茨前所写的最后的出版物中(见第九章)。

图1.6　40岁时的路德维希·玻尔兹曼，时为格拉茨大学教授，正在研究辐射的热力学和继吉布斯之后被称为系综的理论。
(承蒙伊尔莎·法佐尔-玻尔兹曼同意)

与其后期不同，玻尔兹曼在格拉茨的岁月里，避免讨论科学和知识的哲学方面。

在较短的时间里，玻尔兹曼对于动力学理论的研究方式就广为人知了，尤其是在大不列颠，正如H. W. 沃森在他发表于1876年的关

于动力学的小册子中，运用了玻尔兹曼的方法这一情形所表明的。在1882年写的一本麦克斯韦的传记中，他已被赞美为气体动力学的奠基人之一。与他的两位著名的英国同事P.G.泰特和W.伯恩赛德的于1885～1887年间进行的科学争论，非常有助于改善他与英国物理学家的关系。因为没有多少人敢去读他的长篇论文，所以正是通过这些讨论，玻尔兹曼奠定了他的国际声誉的基础。这种声誉或许较早是在英国，而不是在德语世界中成长起来的。因此，他的科学声誉和获得的奖励在不断累积。

总之，我们可以说在他的第二次生活于格拉茨期间，玻尔兹曼成了他那个时代的物理学中一个伟大的名字。这一情形，或许还应看作是那些改变了他的生活的事件的动因之一。

危　机

在几个月中，上一节描述的这种田园诗般的情境和成果斐然的时期突然发生了变化。问题始于1888年1月，并逐渐恶化，直到在当年的5至7月份发展成为一场严重的身体和心理的危机。

到底发生了什么？人们能确定出一系列不愉快的事实，其中没有一件足以解释如此程度的危机，然而把它们全加在一起，却可以说明它，因为它们产生的问题的累积效应，是玻尔兹曼所无力克服的。

第一个有文件为证的心理危机，实际上要回溯到1885年，或许与他母亲的过世有关。这可以解释为一种自然的反应，因为这位在15岁时就失去了父亲的41岁男子，对于他的双亲中惟一在世者充满着深情。不管怎样，我们必须报告的是，在1885年，他没有写一篇科学论文，也没有任何纪录表明他在这一年中写下过什么信件。

进一步的问题起源于前面提到的玻尔兹曼被选为大学校长这一事实：这无疑是一个荣誉，但也是一份繁重的职责，玻尔兹曼对此毫无准备。1887年11月22日，格拉茨大学中亲德国的学生把他们

经常在此聚会的大礼堂中的奥国皇帝的半身塑像取走，并发表了反对哈布斯堡王朝的演说。作为校长，玻尔兹曼不得不对这些学生采取惩戒措施，而他本人也正被施蒂里亚的地方长官、维也纳的中央政权和皇帝本人严密监督着。这在他心中产生了极大的紧张和压力，因为这种过分的责任，更因为这些活动持续了四个多月，直到1888年的春天。

再一个其后果导致了他的问题的事件是，1887年10月17日古斯塔夫·基尔霍夫在柏林逝世。玻尔兹曼于11月15日在格拉茨悼念了他，并在1887年底和1888年初应邀来到柏林，被提名为基尔霍夫的继任人，与亥姆霍茨同事。他马上留了下来，参观了物理学院与实验室，并接受了这一提议，甚至在系里选好了办公室。事实上当玻尔兹曼后来要求撤销这一提名时，相关的合同已于1888年3月为恺撒所签署。人们推测，柏林的相当刻板的生活方式会使玻尔兹曼很不适应，因为他已习惯于格拉茨流行的那种随意的气氛。例如，据说亥姆霍茨夫人在部里与玻尔兹曼商谈完他的职位后，在与同事们共进午餐时，席间曾对玻尔兹曼说："玻尔兹曼教授，我恐怕你在柏林不会觉得那么自在。"但显然这并不足以说明他为什么改变了主意。

无疑，正如为赫夫勒希纳所注意到的，这里肯定还有着在柏林的气氛之外的缘由。实际上，所有与他在柏林的任命有关的交易应当是保密的，但它们在1月中旬已为人所知，其后果是使海因里希·施特赖因茨采取行动，要求更多的地方和更多的资金，他觉得他的这些要求不会冒犯系主任或是别的什么人，因为玻尔兹曼已准备离此而赴柏林了。

2月1日，阿尔伯特·冯·埃廷斯豪森被任命为格拉茨工业学院物理学教授的临时职务。这个学校建立于1811年，到1872年已接近格拉茨大学的水平。1888年，学校里有了物理学的一个空缺，埃廷斯豪森被认为是最佳人选。几周之后，他真的被任命为这一教席。玻尔兹曼失去了他在自己系里的主要支柱，这对他确实是沉重的一击。

当他从柏林回来，玻尔兹曼才醒悟到他干了些什么，并开始意识到他太鲁莽了。至少在那时候，接受一项其他国家的任命，而不首先请求批准，这是不合常规的。结果，他没有勇气通告奥地利当局他已经接受了柏林的聘请。然而，尽管他尚未采取任何正式行动，他的意图却已对任何人都不再是秘密。奥地利不想失去它最著名的科学家之一。为劝服他留在格拉茨，忙碌的谈判开始了，而此时他仍然还是这儿的大学校长。这就把玻尔兹曼逼进了一种两面派的境地，但如我们已从他关于“积分”和“诡计”的双关语中所知的，这类事态显然非他所长，并很快就把他带向了精神崩溃的边缘。在1888年春天，玻尔兹曼发现自己面临着痛苦的两难，因为他不敢澄清他的困境。正如赫夫勒希纳所强调的，从一些他写给普鲁士和奥地利官方的正式信件中，同样从保存在这些官方档案中的带有新提供的薪金的公函和译码电报，及其他文件中，这种情形已十分清楚了。

玻尔兹曼在可怕的混乱和痛苦的状态中挣扎了几个月。当他在3月份收到赴柏林的任命时，他试图利用他的近视，说由于这一缺陷，他就任这一柏林的职位有困难。但来自柏林的回复是，他们会以真诚的理解和关心来接待他，他们仍希望能与他共事。这样，玻尔兹曼谢绝任命的提议没有收到预期的效果。最终，玻尔兹曼被迫违背自己的承诺，写信放弃这个在柏林的他根本就未曾就职的职位。

玻尔兹曼为说明自己态度所写的第二封信中有如下的一段话：

> 当开始在柏林的活动，我将进入一个新的竞技场，数学物理学。在近15年里，我只讲授过数学物理学的基本定义和微积分演算的入门概念……然而，迄今为止我几乎完全忽略了数学物理学的许多广泛而重要的章节。当我在柏林时，在我看来，以我起初的热情，补救我的这点不足是相当容易的。然而现在，当实际处于这新的活动的起始点时，我才认识到它需要我如此多的

精力投入。另一方面，我的良心不允许我开始这样一种新工作：这个工作的责任是如此重大，而我对被任命的工作领域却全无经验。

这封信在我们看来是非常奇怪的，如果我们考虑到玻尔兹曼对于当时正进行的所有研究课题的通晓，考虑到他所享有的名实相符的盛名。然而，人们可能会赞同赫夫勒希纳的解释，认为我们刚才引用的信件中的文字，反映出玻尔兹曼的个性中非常严肃和本质的方面。它们给我们刻画出一个充满焦虑和渴求完美的人物画像：当他不能达到他给自己确定的图像的标准时，他就会为担忧、痛苦和沮丧所折磨。

1888 年 7 月 9 日，恺撒取消了这一任命。

无法安宁

用一些词句来描述发生在 1888 年 1 月至 7 月的那些事件是容易的，但要认清它们在玻尔兹曼的生活和性格中所引起的变化，就不那么简单了。事实上，正是在那时，他的神经衰弱、躁狂抑郁综合征等症状的倾向已逐步显露出来了。安宁和美好的时期结束了，不满和不平静的日子开始了。玻尔兹曼开始对他的决定犹豫起来，开始寻求改变他所呆的地方和大学。如果从一种简单的心理学观点来看，这一点是很奇怪的：因为他刚刚摆脱了柏林的极大诱惑，为什么他不留在格拉茨呢？但这正是他的症状：他已经为了一些甚至自己也说不清的理由拒绝了柏林，因此他开始怀疑自己是否够得上伟大科学家的层次？——他可能已经多少有意识地拿自己与此相比。然而，或许可能格拉茨对他来说还不够重要。大概就是这些思想使他不得安宁。

他的 11 岁的长子路德维希于 1889 年死于阑尾炎，更使他旧愁未解，又添新忧。大多数传统的传记作者把他的抑郁症归因于这个事

件。确实，玻尔兹曼自责未能认识到路德维希病情的严重，而且相信了一个全科医生的错误诊断。这个悲伤的事件确实增长了他的不安全感和孤独感。

首先，他试图离开格拉茨，这里对他而言已成为不愉快之地。这种不愉快有多个理由：由于他自己的行为引起的同事们对他态度的改变；那种他配得上更重要的位置的想法；以及对于刚失去儿子的痛苦回忆。甚至与施特赖因茨及其他同事之间也开始出现问题。到1888年底，他已开始给亥姆霍茨写信，告诉他自己身体已经康复，并再次表示对几个月前放弃的在柏林的职位感兴趣。

然后，他通知了在每一所大学里的同行们，他想离开格拉茨就任新职。理解到这种情形，并抓住了这一机会的是慕尼黑大学的实验物理学教授欧根·隆美尔，他在著名的化学家、未来的诺贝尔奖获得者阿道夫·冯·贝耶尔(1835～1917)的帮助下，于1890年为玻尔兹曼争得了在慕尼黑担任理论物理学教授的任命。这一职位在学校里是一个新的职位，在其他大学里也并不普遍，因此需要对此作出论证。这一仔细展开的论证指出："由于它们在方法上的不同，理论物理学正日益从实验物理学中分离出来——当实验物理学在其归纳性的工作中所需要的有关实验技艺的知识和实践正日趋复杂时，理论物理学在自身的演绎过程中运用数学作为其主要工具，并要求对于这一快速发展的学科的各种手段的本质上的通晓。"这一论证继续指出，物理学正快速增长，其结果是愈来愈少的物理学家能以同样的完美在两个领域中都成为专家，或换言之，他们不得不专攻其中之一。由于他在理论研究上杰出的天才和"最透彻的数学教育"，玻尔兹曼"能进一步发展和补充麦克斯韦、克劳修斯和亥姆霍茨的理论"。哲学学院还提到了他在几个领域里的成就，这些成就为他赢得了最好的理论物理学家之一的声誉。

玻尔兹曼急于离开，其理由与学院希望他来的完全相同，并且他们能把两份任期已终止的教授的薪金加在一起，以供他所需。

当玻尔兹曼离开格拉茨时，学校于7月16日以传统的学院风格举行了隆重的告别聚会。新任校长J.A.特韦斯和玻尔兹曼的同事施特赖因茨致词，都希望玻尔兹曼有一天能重返奥地利工作。玻尔兹曼的答辞题为《论理论的重要性》，后来收入他的《通俗文集》。他如此开始他的答辞：

> 当一些日子以前，我知道今天这个仪式的计划时，起初我想坚决要求你们制止它。因为我反身自问：一个人如何当得起以如此的方式所给予的荣耀？确实，我们所有人都是一个伟大事业中的合作者，每一个在他自己的岗位上尽着他的义务的人，都应得到同样的褒奖。因此，如果一个个人被从共同体中挑选出来，那么在我看来，这决不是因为他作为一个个体，而只是因为他所代表的理念，只是因为他把自己完全交给了一个理念，这个个体才获得了格外的重要性。
>
> 因此，我决定不再坚持我的要求，因为我不再把全部的荣耀与我谦卑的自我相联系，而是连之于这个充溢着我的思想和行动的理念：理论的发展；为了她的荣耀，我作再大的牺牲也不为多，因为理论是我全部生命的内容；让她继续如此，就是我眼下所致谢辞的内容。

由于这一讲话对于理解玻尔兹曼关于理论是什么的观点非常重要，我们将在下面的章节中再回到这篇讲话(第十章)。这里，我们仅引用它的最后部分：

> 如果在开始时，我已经声明我是理论的提倡者，那么我也不否认我已经历过她的魅力的有害后果。但什么能更有效地抵挡这种魅力呢？什么能比一种与当前这样荣耀的聚会相联系的生活更有力地把我们拖回到现实中来呢？对于你们向我表示的这

种好意，我感谢你们大家：首先感谢您，校长先生，感谢您组织了这个仪式；其次，要感谢各位代表，感谢同事们，感谢应邀而来的客人们；最后，要感谢我们母校优秀的儿子们，他们强大的进取精神和高贵的热情，是我在这18年中的支柱。祝愿格拉茨大学成长繁荣，并始终保持在我视野中的最高境界：理论的大本营！

在慕尼黑，玻尔兹曼终于能教授他最心爱的课程了。在教了14年的实验物理学之后，他开始以一种非常生动的方式，用力学模型来阐明理论概念。例如，为了形象化地表述麦克斯韦的电磁理论，他发明了称作双轮车的机器。这个灵巧的模型能用于以机械的术语阐释两个电路之间的相互影响。他把这个机器的制造委托给了格拉茨的手艺高明的技工赫尔·冯·加斯泰格尔。关于这一仪器，埃伦菲斯特在1906年所撰的玻尔兹曼的讣闻中，曾评论说：运动和力的明晰，对于他肯定有着一种美学上的愉悦。曾对量子理论的早期形成和电磁波的数学理论作出过重要贡献的伟大的数学物理学家阿诺尔德·索末菲(1868～1951)，在1944年于维也纳举行的纪念玻尔兹曼百年诞辰的演讲中，回忆起这个奇异的仪器时说：

这个甚至于能很好地运行的模型是应玻尔兹曼的要求而制作的；它依然以应受到的敬意保存在慕尼黑我原先的系里。然而，比之于电动力学，它被更多地应用于力学，即用于理解小汽车中的不同齿轮是如何工作的，其原理完全类似于玻尔兹曼的双轮车。

我们附带注意到，在同一讲话中，索末菲表示了这样的意见：对于路德维希·玻尔兹曼具有原子论倾向的思想来说，量子理论将会是真正的运动场。

双轮车的样品有两台，一台在格拉茨大学，另一台在慕尼黑大学。在格拉茨大学物理系的一本年代为1914年的资产目录上，对于双轮车，以下述方式作了简洁描述："0776：自玻尔兹曼以后，令人费解的具有啮合齿轮的仪器。"这两个样品在战争中都遗失了。玻尔兹曼在他关于麦克斯韦理论的演讲中曾提到他的双轮车，"这一仪器是由技工赫尔·冯·加斯泰格尔制造的；它是第一流的，用它做的实验完全令人满意。"

1985年，在专为纪念玻尔兹曼的一个展览会上，展出了由格拉茨大学的另一个优秀技工赫尔·库尔特·安斯佩格制作的双轮车的复制品。

在慕尼黑，玻尔兹曼总是每周去一次啤酒屋，就着啤酒与一些同事讨论学术问题。在这些同事中，我们可以发现数学家瓦尔特·弗朗兹·安东·冯·迪克(1856～1934)，这是一位极有魅力的人，一位热情洋溢的教师，他是函数理论、拓扑学和位势论方面的专家，也是《数学科学百科全书》的奠基人之一；有阿尔弗雷德·普林斯海姆(1850～1934)，因其关于收敛圆的点上的幂级数的研究而闻名；有物理学家隆美尔和莱昂哈德·泽恩克(1842～1937)；化学家贝耶尔，天文学家胡戈·冯·泽利格(1849～1924)；还有低温学专家卡尔·冯·林德(1842～1934)，他发明了第一台液化空气的装置。在这些交往的推进下，玻尔兹曼举行了关于数学，尤其是关于数论方面的讲座。他就这样度过了安宁的四年。其间，来自世界各国的许多学生在他的指导下在这儿学习。起初，玻尔兹曼住在马克西米利安大街，这儿到学校和歌剧院都很方便。在歌剧院，他可以欣赏到他最喜欢的作曲家之一理查德·瓦格纳(1813～1883)的作品。威廉·金茨尔的《信福音的人》也极为他们家钟爱。

当时，惟一的不利条件在于，巴伐利亚州政府不为大学教授提供养老金。由于他的视力退化日益严重，玻尔兹曼开始担心他家庭的未来。他还记得他父亲的早亡和乔治·西蒙·欧姆失明的事例，由

于没有养老金，欧姆后来在最悲惨的境地中死去。玻尔兹曼夫人已经开始定期地大声念科学文献，以便让他丈夫的眼睛能得到休息。在几年后发表的他的论文《论气体理论》第一卷的引言中，他表达了他对此的关注：在维也纳世界博览会上，弗罗布鲁斯基教授就已要求他写这本书，但他当时谢绝了这一提议，因为他怕自己的眼睛很快会失明。然而，最终说服了他于1896年来写这本书的，当然不是那生硬的回答："所以你更有理由快些把它写出来"，而是这一理论所遭受到的攻击，如我们在后面会看到的。

此外，还在1892年，他就已开始想家了。在一封那年10月份写给洛喜密脱的信中，我们读到：是的，他还活着，"但确实没有在亲爱的古老的奥地利好"。三个月以后，他著名的老师约瑟夫·斯忒藩去世，他在维也纳的同事们开始设法让玻尔兹曼来接替他杰出的前辈的位置。玻尔兹曼在不排除回维也纳的可能时不无犹豫，同时也想巩固他在慕尼黑的地位。结果，慕尼黑说服他留了下来，答应提供某些优惠，其中包括薪金上大幅度的增加、给予一个头衔、配备一名助手等。然而在这之后不久，玻尔兹曼就通知他的维也纳同事们，他觉得有义务在慕尼黑只呆一年。一旦维也纳提出具体计划，他将会接受。

对于玻尔兹曼在慕尼黑的岁月，我们有着一份不寻常的证言，这就是长冈半太郎(1865～1950)，日本物理学研究最著名的推进者之一，于1894年4月写给《亚洲科学与艺术杂志》的一封有趣的信。当时，长冈半太郎年不过30，但两年之后，他成为东京大学的教授。我们可以看到此信由田中节子(SETSUKO TANAKA)从日文翻译成英文的译本，它既包含对于这个城市和慕尼黑大学的看法，也包含着关于玻尔兹曼的名声和个性的一些意见。其中关于玻尔兹曼的部分值得在此引述。其第一部分说明，长冈半太郎之所以去慕尼黑，正是因为玻尔兹曼在那儿开课，这清楚地表明了玻尔兹曼当时是如何地名声显赫。但同样给人印象深刻的是，他也提及了玻尔

兹曼的古怪：

> 慕尼黑被称为艺术之城，正如我国的京都一样。尽管这儿(通常)并没有多少科学工作，但由于近来玻尔兹曼教授应邀在此讲学，我于四月初来到这儿听他的讲课。幸运的是，在这个夏季学期里，他驰名的课程以“气体的动力学理论”和“哈密顿原理对于物理学的应用”为题。我们听说玻尔兹曼教授被邀请去柏林大学继任基尔霍夫的职务，但他未接受这一邀请，而是选择来到慕尼黑。我不知道他为什么这么做。
>
> 我想没有任何人的能力能与他相比，或许亥姆霍茨除外。他的讲课非常明晰；他讲得很清楚，不像亥姆霍茨讲起来很笨拙。但他也有点古怪，有时会做些不明智的事。

长冈继续说明他对玻尔兹曼课程的兴趣，并对它们的内容作了一个概括。他特别对能量均分原理作了一些评论：

> 玻尔兹曼教授出生于奥地利，但他崇敬麦克斯韦，似乎在许多方面都持有麦克斯韦的观点。这种情形对我而言是便利的，因为我受的是英国传统的训练。我特别感兴趣的是由他、克劳修斯和麦克斯韦所发展的气体理论，尤其是从玻尔兹曼自己的授课中，我能清楚地理解近来正争论得不亦乐乎的关于能量分布的麦克斯韦-玻尔兹曼学说。

大约同时，长冈还写了一封给某一田中时期的人(大概不是那位著名的火山学家，他那时只有10岁)的信，表达了相似的意见，尽管用的词有所不同。我们仍然从田中的译文中摘引一段：

> 如你所知，玻尔兹曼教授有着浓密的胡须。学生们对他的

特征印象深刻。但他的课程与亥姆霍茨教授的课相比，显得惊人的清晰。他看来有着非凡的头脑，因为他说明起哈密顿函数或六重积分来根本不用看笔记。

在告诉他的通信者出席玻尔兹曼课程的人数很少后，长冈说道：

玻尔兹曼教授举止文雅，待人真诚，其个性为每一个人所敬爱，与其外表恰成对照。

一座实验楼正在建造，其面积约为柏林大学实验室的一半，但看上去更为坚固。玻尔兹曼教授在实验物理方面只指导一个学生。

1894年，玻尔兹曼成为牛津大学名誉博士，他的思想在那儿有着极高的声望。

就在这年的春天，对于究竟是留在慕尼黑，还是去维也纳，他的选择几乎是每天一变，直到他接受了维也纳的聘任，并于6月份抵达那儿。当时，他是奥地利最重要的科学家，为接待并劝说他留下来所作的准备给人以深刻印象。哲学学院撤销了一个原本需要的化学物理学的职位，因为要省下钱来增加给玻尔兹曼的薪金。他所得到的承诺还包括当他不适宜再工作时能享受全额养老金，并把他以前在奥地利的服务时期也考虑在内。

科学争论与旅行

玻尔兹曼经过巨大努力终于回到维也纳的最初的快慰，并没有持续多长时间。在离开维也纳18年之后，他在这儿，并没有发现像在慕尼黑那样的令人愉快的朋友和同事的圈子。特别是当对自然界的原子图景持有强烈敌意的恩斯特·马赫于1895年成为哲学和科学史教授以后，玻尔兹曼发现自己并非处于所有可能地点中最好的一处。

我们已经讨论过马赫的哲学，尤其是他否认原子的存在这一事实。对于心理比较脆弱的玻尔兹曼来说，有着这么一位公开地反对他毕生所致力的理论的非常著名的人做同事，实在是太难以承受了。在马赫与玻尔兹曼之间并没有公开的争吵，但有一点显然是确实的，就是马赫的个性不同于玻尔兹曼，疏远而冷漠，在与物理学无关的领域里，有时对玻尔兹曼带有一种俯就与恩赐的态度。例如，在一封给哲学家贡珀茨的信中，马赫写道："玻尔兹曼人倒不坏，但却令人难以置信地幼稚和不慎重……他简直就分不清界限。就是在那些对他重要的其他事情上也是如此。"

在这些年月里，那个如我们所知，总是喜欢科学讨论，并像现代科学家一样，认为把自己与其他人隔绝开来，将会毁了科学进步的玻尔兹曼，不得不坚决地反对那些关于物质的原子理论的敌人，而且他确实不乏论证。我们在第十一章将谈到"唯能论"，这里只是提一下，即它在原理上是马赫思想的相当系统的应用，尽管在实践上有点简单化。如果我们不能提那些我们无法观察的事物，那么我们就设法把所有的事物都还原为能量的交换，因为这是我们能以这种或那种方式真正测量的东西，并把物理学的基础奠定在这个观念上。简言之，这就是被称作唯能论的信条。尽管这一概念听起来有道理(尤其是在爱因斯坦发现了质能等价之后)，但这一纲领的贯彻实际上将会使理论物理学的工具日益贫乏，使它的预言新现象的能力日趋萎缩。

因此，我们不会惊异于玻尔兹曼成为唯能论的坚定的反对者。例如，在前面引用过的索末菲的讲演中，我们能读到他所描述的在1895年吕贝克举行的一次会议上，发生于否认原子存在的奥斯特瓦尔德和玻尔兹曼之间的一场辩论：

> 唯能论的斗士是黑尔姆，他的后盾是奥斯特瓦尔德，而作为他们两人的后盾的，则是马赫的哲学(马赫本人未出席会议)。他们的对立面是玻尔兹曼，其次是费利克斯·克莱因。玻尔兹

曼与奥斯特瓦尔德之间的战斗很像一场公牛与敏捷的斗牛士之间的决斗，但此次是公牛击败了斗牛士，尽管他也很灵活。玻尔兹曼的论证击中了要害。我们年轻的数学家都站在玻尔兹曼一边：在我们看来，事情很快就清楚了，单从一个能量方程，甚至于不可能推出一个质点的运动方程，更别说那些有着任意多个自由度的系统的方程了。然而，关于奥斯特瓦尔德的表现，我必须提到他在其《伟大的人》(莱比锡，1909 年，第 405 页)一书中对于玻尔兹曼的评论，他在那里，称玻尔兹曼为“在他的科学的敏锐和清晰上超出了我们所有人的人”。

虽然物理学家乔治·费迪南德·黑尔姆(1881～1923)只是作为唯能论的顽强斗士而留在人们的记忆中，费利克斯·克莱因(1849～1925)却是一位天才的数学家，尤因其对于拓扑学的贡献而为人们所铭记。他是著名的埃尔朗根纲领的作者，构想出了《数学科学百科全书》这一在他的指导下实现的伟大事业。他的名字被用以命名几项数学成就，其中我们在这儿只提克莱因瓶这一项，这是单面表面的典型例子(一种没有边界的默比乌斯条纹)。

玻尔兹曼觉得他受到了孤立，认为他的思想在德国不为人们所重视，并为此事而感到非常苦恼。为了他的这种感觉，他在回答策梅罗对于他的 H 定理的攻击的第一篇论文(见第五章)中反复引用这句话：“策梅罗的论文表明，我的文章被误解了。但无论如何却使我很高兴，因为它第一次表明这些文章在德国毕竟有人们在重视。”

当玻尔兹曼于 1894 年来到维也纳大学当物理学院院长时，他通常有一项职责，就是要指导实验室的工作，但他要求能免除这一责任。于是物理化学教授弗朗兹·埃克斯纳不得不处理实验室事务，这就产生了一种如果不是混乱也是奇特的情形，因为埃克斯纳对两者都不在行。

玻尔兹曼很快就认识到，他回到维也纳不是一次快乐之举。在一封日期为 1898 年 12 月 13 日的写给奥斯特瓦尔德的信中，他坦白

地说这里“比之于德国，这里没有几个学生准备好从事科学工作”，并且没有什么科学会议、科学组织和对于科学的热情。一年以后，他夫人又加了一条，他在维也纳的活动，“就像是中学教育中，教师操练报考人一样。”这对于他的天才或抱负而言，当然是不公平的。类似的观点在玻尔兹曼给他以前的慕尼黑的同事的信中也有所表现。他还说到不满意于奥地利的政治环境。

在玻尔兹曼的众多出国旅行中，最长的三次是去美国。其中第一次是1899年，由他妻子陪同前往。他们在不莱梅登上了德国北方劳埃德协会的威廉·恺撒大帝号轮船前往纽约，途经南安普顿和瑟堡。他给正在举行校庆10周年的位于伍斯特(马萨诸塞州境内)的克拉克大学作了四次讲演，校方也授予了他名誉博士称号。

在这次旅行途中，玻尔兹曼给孩子们写了六封信。第一封是在船上写的，主要谈的是他夫人亨丽埃特的晕船，这使她未能出席一次九道菜的正餐。他们对纽约的印象很深：“在路面上，头顶上方和街道下的拥挤的有轨电车和蒸汽火车确实蔚为壮观，它们行驶得风驶电掣，真是太危险了。”这对夫妇认为波士顿尘土飞扬，环境太差。他们还访问了蒙特利尔、布法罗、华盛顿、巴尔的摩和费城。

1900年，玻尔兹曼决定受聘为莱比锡的理论物理学教授，物理化学家威廉·奥斯特瓦尔德在那儿已经建立了一个很大的研究中心，并向学院推荐他为“在德国国内和国际上最重要的物理学家”。尽管当他得知这一聘任极有可能时，曾写信给奥斯特瓦尔德，说自己已经摆脱了“抑郁的心态”，但事实上接受这一聘任的决定，还是使他非常紧张，精神的崩溃严重到不得不到心理诊所去作短期恢复的地步。

然而莱比锡也同样不适合于他。尽管奥斯特瓦尔德本人是玻尔兹曼的朋友，但他也是唯能论之父。而如我们前面所述，唯能论是立足于马赫哲学，并与玻尔兹曼的思想相对立的。在玻尔兹曼与奥斯特瓦尔德之间的争论，已经激烈到连马赫本人都认为太过分的地步，并提出在力学物理与现象论物理二者之间实行和解。

图 1.7　58 岁时的路德维希 · 玻尔兹曼，时为维也纳大学教授。
（承蒙维也纳物理中央图书馆同意）

这样，在莱比锡，玻尔兹曼发现情形甚至比在维也纳更糟。这种不间断的争论令他很压抑，因为他更喜欢一种协力合作的环境。此外，出于某种原因，他不喜欢萨克森地区正在流行的生活类型，并曾试图自杀。当一个同事问他为什么感到不愉快时，他也答不出为什么。人们或许会猜测是潮湿的气候，或是德国北部新教的习俗，或是其他什么原因。但可以肯定的是，他曾请求萨克森政府因为“健康原因”而豁免他。而且，甚至在离开维也纳之前，他就开始商议回来的事了。

1901 年，马赫因中风而辞职。由于在他自愿离去前往莱比锡期间，他的职位依然空缺，玻尔兹曼于 1902 年回到维也纳。但是官方并没有立即宽恕他的出走。研究与教育部部长本人也很难向弗朗兹-约瑟夫皇帝解释玻尔兹曼的个性问题，并平息流传在维也纳的谣言，

依照这一谣言，玻尔兹曼患有精神疾病，已很难再胜任教授职责。部长不得不去咨询以前曾为玻尔兹曼诊治过的精神病学者和医生的意见，而玻尔兹曼也不得不以书面形式，保证不再试图离开奥地利。幸运地是，他那时已不再仅仅是一个教授，而已成为奥地利的科学独立性的象征。

在维也纳的生活很快也开始出现问题。在一封写给他的助手斯蒂芬·迈尔的信中，玻尔兹曼表示了对学院资金被大大削减的关注。此外，他还必须再等两年，才能被重新选为帝国科学院的正式院士。他对这种情形很生气，这与他当年为去慕尼黑而从皇家科学院辞职有关，而弗朗兹-约瑟夫皇帝本人也反对马上重新聘用他。1903 年 2 月，他夫人写信给他们的女儿伊达(她仍然留在莱比锡以完成她的预科学业)时说："你父亲的情况愈来愈差。他对我们的未来已失去了信心。我设想我们在维也纳的生活会更好些。"他的视力已恶化到这种地步，不得不雇用一位女士来为他朗读科学论文，而他的夫人则负责把他的论文写在纸上。

在夜里，玻尔兹曼饱受气喘病的折磨，或许还有心绞痛的折磨。他也为过度工作引起的严重的头痛症所困扰。他当时的教学任务是：每周五课时的理论物理学课程，同样主题的讨论班，以及每三个学期一次的每周至少一课时的课程。此外，自 1903 年以后，玻尔兹曼还要教原来由马赫教授担任的每周两学时的哲学课。不难想象，这么沉重的负担，再加上科学研究，已远远超出了他原本脆弱的健康所能承受的范围。

由于他以前在维也纳大学工作过，以及他与埃克斯纳之间的分工所造成的奇特情形，在对于物理仪器的控制和使用上也产生了误解。玻尔兹曼不得不放弃过某些仪器，但部里却向他保证，他会得到足够的钱，以购买所失去的和其他需要的仪器。玻尔兹曼事实上在 1902 年和 1903 年要求并两次得到了钱。

关于哲学的讲座，是玻尔兹曼所作的最通俗的讲座。而他本人

在被指派开设这一课程时，也设想哲学是他内心里真正的冲动。第一次讲座是一次伟大的成功。尽管选用了最大的礼堂，听课的人还是站到了台阶上。礼堂被装饰一新，他受到凯旋式的热情欢呼。所有的报纸都报道了这一事件。他收到了大量赞许的来信。他还应邀受到弗朗兹-约瑟夫皇帝的接见，皇帝告诉他，非常高兴他能回到奥地利，且已听说出席他的讲座的人是如此众多。然而，在讲了两三次之后，他的热情减退了，而听众也同样如此。这导致了一种失落感。从这些年月里他写给弗朗兹·布伦塔诺(1838～1917，他当时不得不离开他在维也纳的哲学教职，因为他是一位天主教牧师，而且当时结了婚)的信中，人们可以理解这些讲座对于他的重要性。他还带着那种人们去见精神病医生的态度，去佛罗伦萨见过布伦塔诺。

玻尔兹曼继续着上面提到过的晚上的社交活动。尽管如此，在生命的最后岁月里，他经常在凌晨5点仍在工作。从此情形中，我们也可以看出那种躁狂抑郁综合征的症状。那些受此病症折磨的人在狂躁状态中总是趋于醒得很早，并拼命地工作，而抑郁状态则使他们在白天昏昏欲睡，倦于活动，而在凌晨却无法入眠，并总是伴以不愉快的念头和想到自杀。然而，1904年10月，玻尔兹曼参加了在圣路易斯举行的一个会议(由他儿子阿图尔·路德维希陪同，就像在1901年进行的地中海巡游一样，当时是为了改善这位科学家的健康状况)。这次历时10天的从汉堡到纽约的旅行，乘坐的是汉堡—美国航线的“贝尔格拉维亚”号邮船，旅途上很不舒适，尤其是持续的呼啸噪声，使人难以入眠。此次他们还访问了底特律和芝加哥。回来时，他们乘坐的是“德意志大地”号。

1905年，玻尔兹曼独自最后一次前往美国，在伯克利加利福尼亚大学举办的暑期学院，他作了30次演讲。他与奥斯特瓦尔德一起被邀请前往讲学。关于这最后一次旅行，他曾有过一个挺逗乐的描写，题目是《一位德国教授的加州之旅》(此文的译本被收在本书的最后)。

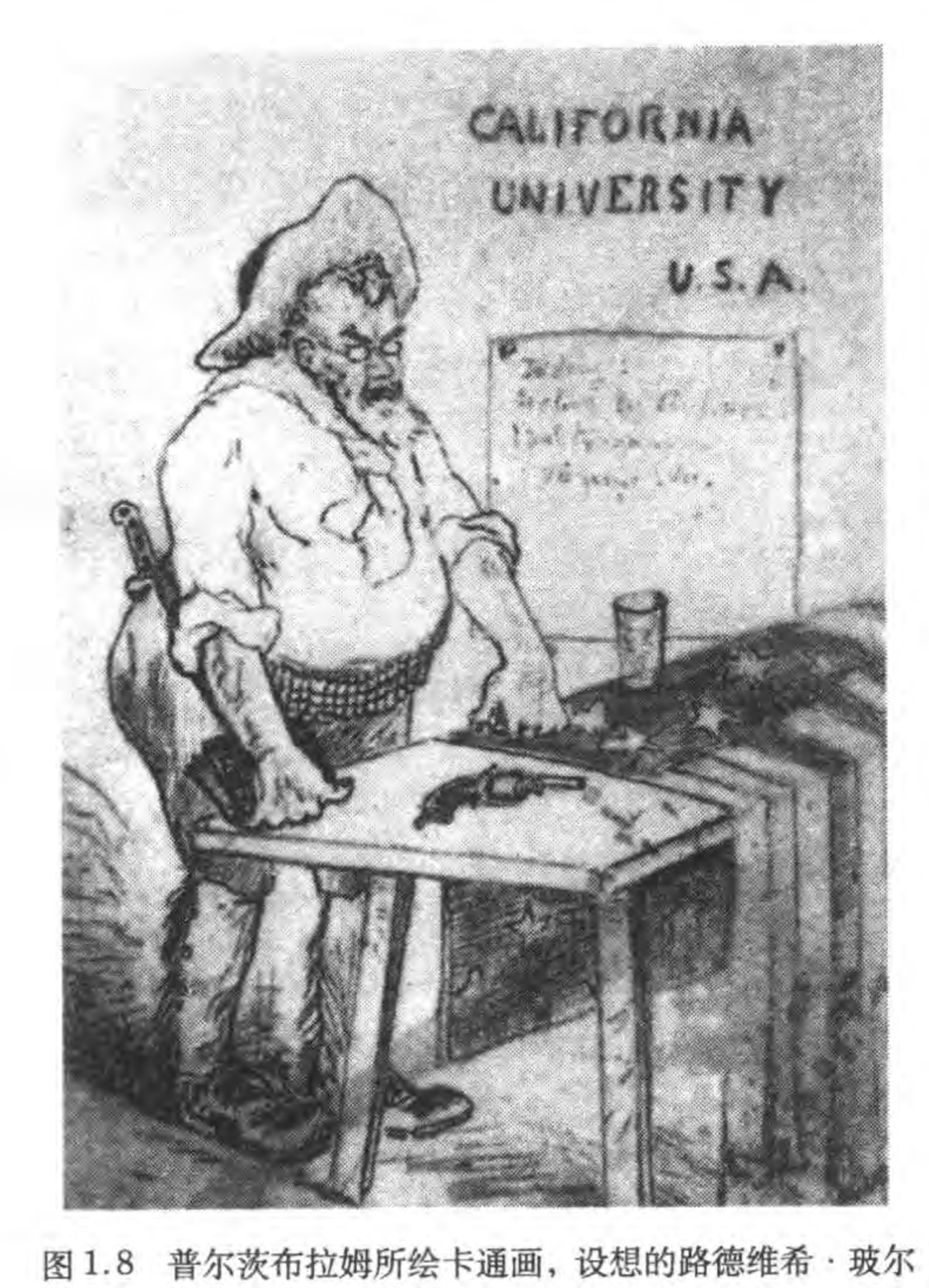


图 1.8　普尔茨布拉姆所绘卡通画，设想的路德维希 · 玻尔兹曼在加利福尼亚讲演。（承蒙迪特尔 · 弗拉姆教授同意）

在 1905 年 7 月的美国长久逗留期间，玻尔兹曼饱受气喘病的折磨，这在以前的旅行中不曾发生过。他就此曾写信给前面已经提到过的他的助手斯蒂芬 · 迈尔：

> 我之所见是非常有趣的，我也希望能见到更多有趣的事物，但是所有这些都令我精疲力竭。首先，是因为加利福尼亚的气候并非如人们经常听到的那么适宜。从亚热带的炎热变化成寒冷的气候，从干燥的气候变为大雾笼罩，这让一个欧洲人很难承受得了。此外，庞大的蓄水池中从冬天保存而来的雨水，也让我的肠胃不适。人们总是像学校学生隐藏他的雪茄烟一样，把酒藏起来，这就是他们所说的自由。

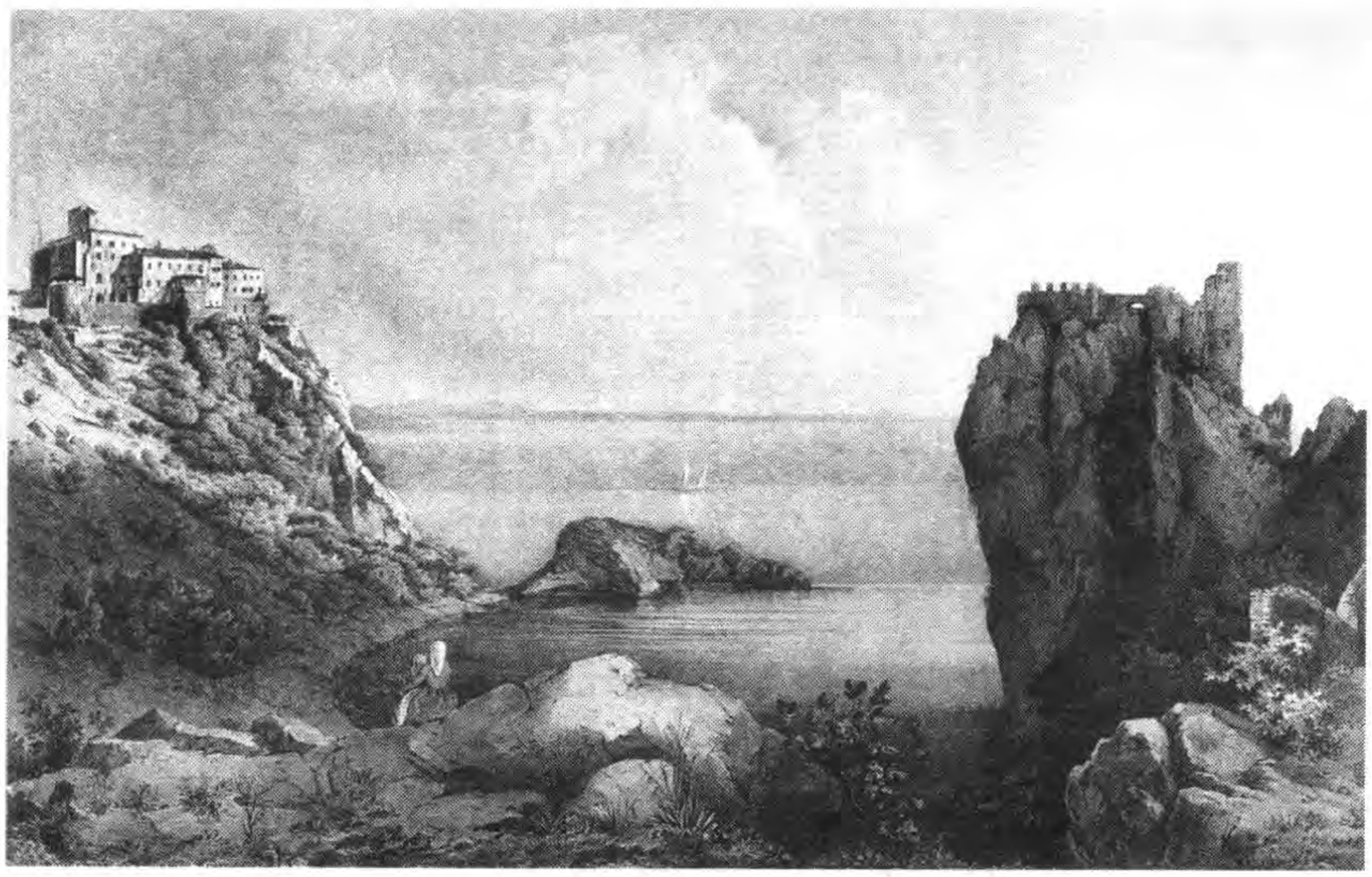


图 1.9　带有新旧城堡的杜伊诺的景色。（取自奥古斯特·塞尔布《奥地利海滨游历图片集》，A. A. 蒂施拜因，的里亚斯特，1842 年）

我们也能从当时的地方报纸上读到玻尔兹曼的加州之游。《加利福尼亚日报》（第 25 卷，第 17 期，第一页）说：

玻尔兹曼教授在世界物理学家中排名甚高，与瑞典物理学家阿仑尼乌斯和荷兰著名的植物学家德弗雷斯同属一流科学家之列，后两人也是最近一期暑期学院的教员。

稍后的文字是：

（暑期学院）院长惠勒确保由杰出的科学家和教授来指导暑期课程的努力，由于维也纳大学理论物理学教授玻尔兹曼接受了他的邀请，而获得了极大的成功。

在他的研究领域中，玻尔兹曼博士作出了卓越成就，使他得以跻身于世界最伟大的科学家之列。他在数学物理学中取得的成就，就像阿伦尼乌斯在物理化学中所取得的成就一样。

图 1.10　普尔茨布拉姆所画的正在演讲的路德维希·玻尔兹曼。（承蒙迪特尔·弗拉姆教授同意）

在告诉读者“玻尔兹曼博士是健在的最伟大的原子理论的阐释者”之后，报纸报道了关于他的进一步的信息：

> 玻尔兹曼博士是如此深奥和前沿的思想家，现有的数学对于他的一些高深的研究来说，已不敷其用，因此他必须发展出他自己的数学公式来。

类似的报道可以在 6 月 29 日那一期的《记录》上读到：

> 玻尔兹曼博士已经抵达暑期学院，将指导为期六周的高等课程。他是欧洲最杰出的物理学家，在德国的 30 年中，曾在几所大学任教。
>
> 路德维希·玻尔兹曼博士与杰出的物理学家阿伦尼乌斯和植物学家德弗里斯一样，都属于世界一流的科学家，也都是最近一期暑期学院的明星。去年，当他来到这个国家参加在圣路易斯

世界博览会的国际艺术与科学会议时，曾被邀请来加利福尼亚访问，他没有接受这一邀请，但答应今年夏天来。这是他第一次访问太平洋海岸，繁忙的日程使他总是呆在大西洋那一边。在过去的30年中，他先后任教于格拉茨、慕尼黑、莱比锡和维也纳大学，他在最后一所大学的任职始于1902年。

我们从他对旅途的报告中知道，玻尔兹曼非常为他的英语自豪。然而出席他演讲的人在评论中对于他运用语言的能力却不无保留。一种评论是他的语言能力“有某些欠缺，如果温和地说的话”；而“噢，今晚上我可算认识他了”则是另一种评论。或者更清楚地表示为：

> 据说当他用德文演讲时，绝大多数人都能领会他的意思。但他却一周四次地用(所谓的)英语来讲，题目是“带有特殊指称的热力学对于统计力学定理的力学类似”。

据赫夫勒希纳所说，“伯克利的人们至今对于玻尔兹曼在伯克利的表现还有些不满，他们把它看作是狂躁的痴迷与著名德国教授自命不凡的做作的混合物。”

一个伟大科学家的悲剧性命运

玻尔兹曼的生命悲剧性地结束于1906年，当时他正与他夫人和最小的女儿在杜伊诺盘桓数日。杜伊诺是靠近特里斯特的一个小山村，因村中的坐落在俯瞰亚德里亚海的岬角岩石上的城堡而著名，城堡一面临海，另一面则是大片大片一望无际的栎树林。城堡与诗人赖纳·马利亚·里尔克的名字相联系，他曾数次来到这儿，并写下了他的《杜伊诺悲歌》。弗朗兹-约瑟夫的妻子伊丽莎白皇后(即著名的系列电影中的“茜茜”)、作曲家弗朗兹·李斯特等也曾在那儿逗留。

玻尔兹曼从不为他的健康担忧，而是把它全部奉献给了科学事业。然而，当甚至在杜伊诺的休假也无助于其疾病的缓和时，一时的极度沮丧使他于1906年9月5日上吊自杀，而他原本应该在第二天回维也纳开始他的课程。

这一突然的事件有可能解释吗？如何把它与仅仅几个月之前他对于美国之行的幽默描述相协调？或许出访美国使他筋疲力尽，十分失望，他在伯克利的讲演与在维也纳的科学哲学讲座一样，并非如预期的那么成功。如我们在下一节将要说到的，玻尔兹曼被认为是一位优秀的教师，他的听众都有这样的印象，即他对所讲的课程很感兴趣，并非常愿意讲授这些课程。但我们从他的助教斯蒂芬·迈尔那里得知，讲课对于他而言是痛苦的，每当有可能取消一次课程，他的感觉都是如释重负，而不会是失落或失望。每当他讲课时，他都像是一位演员，渴望能尽其所能。然而，像那些体验到失败的演员一样，他也会非常悲哀和沮丧。在科学哲学课程这个例子中，他就既会有担忧，也会有畏缩。

他描述他的加利福尼亚之行时，正是他欣快征最后几次发作的时候，在这个折磨他的典型症状之后跟随而来的，就是所有可能的极度抑郁。我们还应补充的是，在那些日子里，自杀在维也纳知识分子中十分普遍，如我们在本章稍后一节中将看到的。

一些文献和证据使我们能回溯玻尔兹曼最后时刻的若干方面，表明他行为的某些深层的和表面的理由。考虑到他所承受的病魔折磨的严重性，即使是那些表面上的动机也不应被轻易忽视。其中有些在一本讨论不可逆性的书中已经公诸于众。

1906年5月，维也纳帝国—皇家大学哲学学院院长写信向主管部长报告，玻尔兹曼所患的神经衰弱已相当严重，不宜再从事任何科学活动。

而关于他的视力问题，一个特别精确的描述是："认识玻尔兹曼的人都会记得架在他鼻子上深沟里的那副沉重的深度近视眼镜。许

多年来，他的视力已经衰退了，他发现日益难以完成许多头脑里想到的研究。”

现在，让我们来想一想许多与玻尔兹曼的身体和精神健康相关问题的印象。在说到1905年的下半年时，一位匿名记者说：“最后，在这年的秋天，这位学者决定去慕尼黑附近的一家精神病医院，但短时间之后，他又离开了精神病院并回到了维也纳。”

路德维希·弗拉姆是玻尔兹曼的学生，并与其女儿伊达结了婚。他是首先讨论施瓦茨席尔德时空——这一爱因斯坦的广义相对论方程最为著名的精确解——的三维截面的直觉意义的人之一。他说：

> 我作为学生，听了玻尔兹曼就理论物理学所讲的最后的课程；那是在1905年到1906年的冬季学期。神经上的疾病使他不再能继续他的教学活动。和另一位同学一起，我到他在沃灵的居所去通过了口试。在考试结束准备离开时，我们听到了来自前厅的他的令人断肠的呻吟声。

阿洛伊斯·赫夫勒在提到1906年时说：“当我最后一次在复活节期间拜访他时，他这样来表示他在身体和精神上的痛苦：‘我从未相信有可能会是这种结局。’”

然后是同年夏季，我们至少从马赫处了解到：

> 玻尔兹曼已宣布要在[1906年]夏季学期开课，但又因为他的神经状况而不得不撤销了它们。在知识分子圈里，大家都知道玻尔兹曼很可能再也不能从事他的专业了。人们在谈论很有必要让他处于经常的医务监督之下，因为他已作出过较早的自杀尝试。

当他为满足妻子亨丽埃特的一个多年的心愿(如我们在亨丽埃特早年写给他的一封信中所发现的)而来到杜伊诺时，按照1906年9月

7日《时报》上一篇文章所说，玻尔兹曼“心烦意乱，心神不宁，因为他现在急于回到维也纳。他其他方面的情况看来好了一些。他去世那天看上去特别兴奋。而当他妻子和女儿去游泳之后，他采取了这一行动。”

莉莉·哈恩博士夫人提供了另一个信息：“很长时间里他都十分忧郁，他不愿把他的外套送去清洗，因为那样意味着要继续耽搁回维也纳的日程。在他夫人带着外套离开后，他吊死了自己。”

关于他采用的方式，《时报》作了如下报道：“他用了窗帘横杆上的一截绳索。他女儿首先发现了他。”

至于玻尔兹曼自杀的地点，则至少有两种说法。比较可能的是在旅馆房间里。而奥古斯特·迪克夫人声称，玻尔兹曼的一位同事数学家默滕斯报告说，他是在杜伊诺的教堂里自杀的。

亨丽埃特比她丈夫多活了许多年。她在长期患病后，逝世于1938年，享年85岁。

为玻尔兹曼的去世所震惊的人们中，有当时年方19岁的埃尔温·薛定谔。如W. 穆尔在近来出版的一本传记中所述，薛定谔原期望能在数月内，在这位物理学大师的指导下开始他的理论物理学学习。薛定谔自己描述了那年秋天他进入物理学院大楼时的感觉。1929年，当他在普鲁士科学院发表就职演讲时，他说：

> 陈旧的物理学院，刚刚经历了路德维希·玻尔兹曼以一种悲剧性的方式被夺去生命的悲痛。弗里茨·哈泽内尔、弗朗兹·埃克斯纳和其他许多玻尔兹曼的学生忙进忙出，使我直接感受到了这一有力的精神。对我来说，他的思想体系扮演着一种为科学青年所热恋的角色，再没有其他思想能使我如此着迷。

另一位曾为玻尔兹曼的自杀而心灰意冷的人是路德维希·维特根斯坦(1889～1951)，他于1906年离开林茨时，曾希望师从玻尔兹曼

学习。维特根斯坦因其发表于第一次世界大战刚刚结束时的《逻辑哲学论》而闻名，按照雅尼克和图耳敏的看法，他在此书中试图解决的是，如何调和赫茨和玻尔兹曼的物理学和哲学与克尔恺郭尔和托尔斯泰的伦理学问题。

关于玻尔兹曼在杜伊诺的死，穆尔恰当地摘引了赖纳·马利亚·里尔克(1875～1926)的《杜伊诺悲歌》的第一卷：

> 然而爱人被精疲力竭的自然
> 召回自己的怀抱，尽管这样的创造力
> 却再也不能重新施展。

这一段诗歌，或许反映了玻尔兹曼觉得生命的艰难和沉重已超出了其他任何事情的重要性时的感受。他是一位被欺骗了的恋人，他把自己奉献给了原子理论，但他的爱却没有得到回报，因为同时代人都不能理解他伟大的远见。但是如果我们用事后的认识来看待他的自杀，我们或许会把他看作为一位英雄，而不是一位恋人，并回想起为穆尔所引诗句的紧靠着的前两句：

> 看来：英雄依旧，即使他的死亡
> 也不过是继续生存的托辞，一种终极的出生。

作为教师的玻尔兹曼

玻尔兹曼是一位优秀的教师。他有着惊人的记忆力，上课时总是脱稿讲课。他是一位天生的教师，他的讲课清晰得就像水晶，机智、幽默，充满了令人回味的轶事。他常用一些不寻常的表示来活跃课堂，比如说“非常巨大的小”。在他所开的哲学课上，他也常讲到一些当时看来还是异乎寻常的事，例如多维的弯曲空间等等。

一位学生在下面的打油诗中恶作剧地提到这一点：

当一个普通人踩着一条蚯蚓，它会弯曲起来；
当路德维希·玻尔兹曼踏上舞台：看，空间会弯曲起来！

这个笑话表现出由路德维希·玻尔兹曼的突出个性和他的课程所造成的巨大效应。

在维也纳，他的学生中有保罗·埃伦菲斯特(1888～1933)、弗里茨·哈泽内尔(1874～1915)、斯蒂芬·迈尔，还有一位由慢中子引起的铀裂变的未来发现者丽丝·迈特纳(1878～1968)。在格拉茨，他的学生有斯旺特·奥古斯特·阿伦尼乌斯(1859～1927)和瓦尔特·能斯特(1864～1941)。哈泽内尔(他写于1904年的最著名的论文预言了质量和能量的等价，只是因子不正确)在写到他时说："他从不表现出优越感。任何人都可随意向他提问，甚至批评他。交谈总是很平和地进行，学生总是被当作同等的人。只有到后来，人们才意识到从他那儿学到了多少东西。"他在格拉茨的同事H.施特赖因茨写道："他在任何困境中都给你忠告。即使学生在他工作时到他家里打扰他，他也不会烦躁。这位伟大的科学家能数小时地解答学生的疑难，总是极有耐心，性情温和。"关于他的课程，丽丝·迈特纳说：

他讲了一门历时四年的课，包括经典力学、流体动力学、弹性理论、电动力学和气体运动论。他习惯于把主要的方程写在一块大黑板上，旁边用两块小黑板，写上即刻的步骤。一切都写得十分清楚有序。我常有这样的印象，人们可以从黑板上的内容，重溯整堂课的过程。每次课后，我们都像被领进了一个新的奇妙的世界，这就是他在他的教学中所倾注的热情。

玻尔兹曼所主持的讨论班也同样非常地激励人，如埃伦菲斯特在

他的论文中所表述的。

玻尔兹曼死后，理论物理学课程停了 18 个月，直到哈泽内尔被聘任到这一空缺的职位上。哈泽内尔的就职演说，是对于玻尔兹曼统计理论的出色综合，也是对于这位科学大师哲学思想的阐释。

玻尔兹曼与发明

玻尔兹曼不仅对科学问题十分着迷，而且也为有前景的科学发明所吸引。尽管如我们前面说过并要在第九章详细讨论的，他是一位杰出的理论家，但他同时也是一位脚踏实地的科学家，对实验工作有着特殊的技巧和兴趣，这或许来自于他祖父的遗传——如我们在本章开篇时所说，他祖父是一位制作音乐盒的工匠。

玻尔兹曼对于技术有着浓厚的兴趣，不止一次地称赞过技术在科学发展中的作用，如人们在第十五章中所引用的他在《通俗文集》一书的两段文字中会看到的。在玻尔兹曼看来，科学不应为自身目标的理想性质而骄傲，也不应轻视技术和实践，因为它的诞生，就应归功于为满足纯实际需要而作的努力。此外，他还补充道，如果科学没有非常杰出的技术专家做开路先锋，其成功也不会有如此辉煌。再者，甚至逻辑也是技术成就的结果。如果我们没能获得它们，我们也就不会懂得如何推理。只有这些推理是正确的，才会导致实践中的成功。显然，玻尔兹曼是在应用他的达尔文式的关于大脑发展的观点，即大脑是产生世界图景的工具。这一器官由于这些图景对于物种保存起到极大功效，而在人类中发展到特殊的完善程度。这并不仅仅是一种哲学论点，这一点已为目前提到的一些事实所证明。

1902 年，能斯特发明了他的电灯(现在实际上已经被遗忘了，用一个小的铂螺旋丝加热的稀有氧化物制成的小圆柱所构成)，他送了一些样品给玻尔兹曼，而玻尔兹曼则写下了下面这些诗句：

因为由你自己选择，你选择了最耐熔的材料
并迫使它负载电流，
这使你能创造最灿烂的光芒。

他还邀请维也纳物理学会的成员出席一个国内的电灯演示会。发出了55份邀请函，为客人准备了许多三明治和50升啤酒，但只来了七个人。这表明他的热情并非总是为他的同事们所共有。

玻尔兹曼也鼓励过克雷斯，后者于1880年发明了一架飞机。1894年，他甚至就这一发明在德国科学家和医生协会作过演讲。玻尔兹曼特别预言了飞机对于飞艇的优势。不幸的是，克雷斯与许多其他国家的发明家的命运相似：他资金用完了，也就被人遗忘了。

玻尔兹曼对于人类的飞行非常乐观，并与他最喜欢的英雄哥伦布作过比较。为使这一类比更为有力，他还引用了席勒关于哥伦布的诗句：

前进，光荣的水手，不理睬人们对你的嘲笑，
让那些懒惰的水手放下舵柄！
向着西方前进，始终向着西方！
正是在那儿，海岸将会出现。看着它，照耀在你的头上！
天才并驾齐驱，与自然永结同盟；
前人许下的诺言，后人必将信守。

玻尔兹曼还用自己的实验技巧，为妻子制造了一台电动缝纫机，她用它来为家里所有的人做衣服。

路德维希·玻尔兹曼与他的时代

玻尔兹曼生活于他的祖国和整个欧洲相当特殊的一个时期。几个世纪以来，奥地利在欧洲都是居领导地位的国家，足以与法国和英

国相抗衡。而维也纳则是与巴黎和伦敦同一等级的伟大都市，由于在世纪初它的人口有约200万，它在当时是一个名副其实的国际大都市。然而，奥地利在欧洲，乃至于欧洲在世界上的中心地位在18世纪末已经开始衰退，两个并非全然无关的事实，美国革命和法国革命，同样作为欧洲文化的最高点——启蒙运动——的产物，已经改变了整个世界。前者为美国的可怕的崛起和扩张提供了动力，而随后者而来的则是世人瞩目的拿破仑及其战争，不可逆转地改变了欧洲政局。1815年，维也纳国会恢复了旧的体制，但这是一个不稳定的解决办法，注定了迟早是要崩溃的。欧洲的新的版图与拿破仑之前的版图非常接近，是天才的外交家和政治家梅特涅亲王的杰作，他成功地实现了看上去几乎不可能的奥地利公主与拿破仑的联姻，使拿破仑与奥地利在反对沙俄帝国的战争中结为盟国，并使得奥地利几乎与以前一样强大，只是控制着不同的区域(意大利和巴尔干半岛、匈牙利、波希米亚，以及波兰的一部分，而不再是德国)。梅特涅亲王是弗朗兹一世皇帝恭顺的首相，在脆弱的费迪南皇帝执政的30年战争时期，也是他的意志的忠实的执行者。正如梅特涅本人——他遵循弗朗兹一世制定的法则办事，即使他并不总是赞同它们——所说："欧洲我也曾治理过，而奥地利，我却从未染指"。弗朗兹一世的目标，就是迟缓地维持现状，即使这意味着要保留他的前任，开明的约瑟夫二世的某些政策。弗朗兹曾经说："我的王国就像一个陈旧的房屋。一旦移动一部分，谁也说不准有多少地方会倒下来"。因此毫不奇怪，19世纪为人们所注目的是不同国家中独立战争的兴起，或是政体的更迭，如在法国。而奥地利则依次被法国(1859年)和普鲁士(1866年)击败，这后一场战争结束了哈布斯堡王朝在德语世界中的霸主地位。奥地利至多成为一个二流强国，而德国皇帝则脱颖而出。意大利在两次战争中都站在了胜利者一边，因而也获得了自身的独立。1867年，匈牙利问题得到解决，其途径是创造出两个国家，奥地利帝国和匈牙利王国，但统一在同一王朝的治理下。

所有这些，当玻尔兹曼开始其科学生涯时都已结束，因此，他享受了一段没有战争的时光。与斯拉夫人、捷克人、意大利人和匈牙利人之间依然有着争端，但都得以用和平的方式加以解决。因此，例如两个过去的敌人，奥地利皇帝和意大利国王，已和解到至少可以同时出席一个节日庆典，在威尼斯的凤凰剧院(这个剧院于1996年1月毁于一场大火)观看多尼泽利的演出，及随后演出的芭蕾舞。

真正爆炸性的行动——波斯尼亚-黑塞哥维那为奥匈帝国所吞并，它引发了塞尔维亚爱国者的激烈反应，并在弗朗兹-约瑟夫皇帝的继承人弗朗兹·费迪南大公被刺之后发生于玻尔兹曼死后的1908年，导致了1914年第一次世界大战的爆发。

当玻尔兹曼逝世时，罗伯特·穆西尔(1880～1942)——他以前曾获得工程学学位——可能已开始写他的关于马赫的论文了，他凭此论文获得了他的哲学博士学位(柏林，1908年)。在他的鸿篇巨制的小说《没有特性的人》中，穆西尔对于那个时代的弊病，对于包藏在伪装之后对生活的虚伪态度，进行了讽刺性的分析，并致力于把科学思想的精确性应用于社会和精神方面的经验，其中对于奥地利和维也纳的一些生动的和充满深情的描写，或许能为我们再现玻尔兹曼对于他那个时代的氛围所曾有过的印象。小说中的一个人物乌尔里希(被假设为作者的原型)提出，在伦理学中，每一事物都忽前忽后，到处飞扬，就像分子按照气体运动论运动一样，产生出非常稳定的平均结果和非常奇怪的一致。因此，进步就是概念随机飞翔的统计后果，单个人的行为对于历史的进程毫无影响。

这样，我们可以大量地运用穆西尔的描述。有时，我们会从小说的英译本中直接引用他的原话，而其他地方我们将表示他句子的大意。

穆西尔为他的祖国杜撰了一个特殊的名称，卡卡尼亚。这个国名结合着两个含义：一是它出自“帝国”和“皇家”这两个德文词的第一个字母K.K.(k-k)，它们出现在帝国所有主要机构的名称前；其

二，熟悉德语儿童语言的人，也知道它有着可被翻译为“臭大粪”或“废物之地”的意思。

穆西尔是这样谈论弗朗兹-约瑟夫的：

> 卡卡尼亚的皇帝和国王是一位传奇式的年事已高的绅士。由于当时有大量的书籍以他为题材，大家都清楚地知道他做过些什么，阻止了什么，还留下些什么没有做；然而以后，在他和卡卡尼亚生活的最近十年中，对艺术和科学的当前状况比较熟悉的年轻人有时甚至于会怀疑他究竟是否还存在。人们所看到的他的画像的数目，几乎像他国土上的居民一样多；在他的生日里，人们狂吃猛喝，就像在耶稣诞辰一样；在山冈上，篝火熊熊燃烧，千百万人的声音在宣誓：他们热爱他，就像热爱自己的父亲一样。最终，赞美他的颂歌成了诗歌和音乐的惟一工作，卡卡尼亚人几乎人人都至少会上一段。然而，这种普及性和公众化如此地过分令人相信，以至于成了这种情形：相信他的存在就好像仍然能看见某些星星，虽然这些星星几千年前就不再存在一样。

在奥匈帝国，这是个过去时代的遗物，但依然是完善管理的模范，人们总是试图减缓前进的速度。这与人们所知道的美国的城市恰恰相反：那里人们的跑动和停止似乎都拿着一个记时计。我们已经看到了给玻尔兹曼印象最深刻的东西：架在空中的和潜入地下的列车，航空邮件，电梯，火车，汽车载着人们和新闻垂直或水平地运动，在不同交通工具之间，只留给人们说几句话的可能，直到很快为一个永远运动着的发展着的社会所吸进去并吞咽下去。问题和回答必须安排得就像齿轮上的齿，活动在某个地方被组合起来，人们在路上边走边吃，当娱乐被组织在某一区域，人们却住在其他地方，在那儿，巨大的楼房就像容器一样，盛载着家庭、留声机和灵

魂。为了幸福，人们必须达到某个目标，至于这个目标是什么，那倒无关紧要。

当然，这就是纽约，当人们想到美国，他们想的总是纽约。这个国家给一个欧洲人留下的回忆是一幅朦胧的图像，只有其中不时浮现出的与牛仔和荒野的西部相关的鲜明印象，才使对这新大陆的不真实感增添几分感触。

美利坚合众国(仍然被英国维多利亚女王称为“叛乱的殖民地”)此时在基础科学上落后了，因为尽管出现了几位(例外的)卓越的物理学家(本杰明·富兰克林，约瑟夫·亨利和乔赛亚·威拉德·吉布斯)，人们对发明和科学的应用，比以一种原创性的形式来发展科学的文化的和基础的方面更感兴趣(塞缪尔·莫尔斯，托马斯·阿尔瓦·爱迪生，亚历山大·格雷厄姆·贝尔)。

在欧洲，尤其是在奥地利，人们对大西洋彼岸的奇异新大陆的发展有所了解，但并不急于去模仿那种生活。当远离他的祖国时，奥地利人总是这样来想象她：这里有着整洁的道路，宽阔而舒适，人们或是在路上行进，或是乘坐公共马车。这些道路蜿蜒而行，通向四面八方，好像是预先排序的河流，又像是用作制服的坚质条纹布上的丝带，以一种官方式的拥抱，环绕着山冈和河谷。我们在玻尔兹曼对于他的加利福尼亚之行的描述中，也可看到这种情感，他在描述中，比较了美国的山区风光与奥地利农村随处可见的景色。

这是多么不同的农村景象！海洋，冰川，卡尔索洞穴，波希米亚麦田，亚德里亚海边的夜晚，蟋蟀不停地鸣叫，斯洛伐克农庄上空烟囱里飘出的缕缕炊烟，仿佛出自狮子的鼻孔，而农庄蜷缩在两座小山冈之间，就像是大地微微张开了她的嘴唇，温暖着她的孩子。第一辆汽车已经出现，也已开始想象征服空间，但并不那么积极。偶尔有一艘轮船驰往拉丁美洲或是东印度，但并不经常。奥地利人不那么抱有帝国主义的野心，特别是自从确立哈布斯堡王朝的马克西米利安(弗朗兹-约瑟夫的弟弟)为墨西哥皇帝的失败，以及他于1867年

为贝尼陀·朱厄雷斯的共和军处死之后。这里的人非常高兴地看到他们处于欧洲的中部，古代世界的轴线在此交汇。诸如“殖民地”和“国外”这样的词汇，听起来是如此遥远和陌生。这里也有着一些奢华，但决不像在巴黎那么优雅讲究。这里也有一些体育运动，但决不像在英国那样积极冲动。至于军事野心，穆西尔是这样描述的：“大量的钱被用于军队，但在列强中仅足以维持次最弱军队的地位。”

类似地，维也纳稍小于世界上的其他国际大都市，但又略大于一般的大城市。像欧洲其他的国际大都市一样，构成它的有：不规则性，变动，堕落，周期性，事物与事件的碰撞，以及穿插于这些之间的深深沉默的时刻，火车和未开垦的土地，伟大的韵律节拍和各种节奏的永久的不协调和瞎搅和。总之，它就像壶中沸腾着的气泡，充塞着房屋、法律、规则和历史传统。不管怎么样，它是一个伟大的文化中心。一般而言，人们可以说整个德语世界的文化地位正逐渐增长到足以与法国和英国相抗衡，甚至使之相形见绌的地步。

奥地利——这里指的并非今天这个小国，而是一个伟大的帝国，即使其地域不再如查尔斯五世时那么辽阔——是由欧洲最好的官僚机器管理着的，他们精明、谨慎，并有能力指导去小心地平息每一个角落，其惟一可以批评的方面，在于对这个官僚统治来说，个人的天才和事业心，如果不能有尊贵的出身或政府职位为保障，那么拥有这种天赋是不恰当的和冒昧的。无论如何，没有人愿意看到由一个未经许可的人来制定法律！于是一个天才总是被想成是傻瓜，但它决不会像在其他国家那样，让一个傻瓜来取代天才。

用穆西尔的话来说：

每一件事物和每一个人都是帝国—皇家(k-k)的，都是帝国和皇家(k.u.k)的，但学问的深奥仍然在于有把握区分哪一个机构被归之于k.k，而哪一个被归于k.u.k。在书面上，它自称为奥匈君主国；然而在言谈中，人们都称之为“奥地利”——这就

是说，作为一个国家，人们都知道这个名称已被庄严地宣布放弃了；而当事关情感时它又保留了下来：这标志着情感像宪法一样十分重要，而规则在生活中并不是很当真的。按照政体，它是自由主义的，而它的政府制度却是教权制的；当政府体制是教权制的，但普遍的生活态度却是自由主义的。在法律面前所有的公民人人平等：当然并非所有的人都是公民。国会是有一个的，但由于如此严格地行使它的自由，它通常都被关闭着；此外还有一个非常权力法，通过它，就可以在没有国会的情况下照常运作。而每次当人们刚开始为专制主义而欣喜，君主就又出来颁布法令：现在必须重新回到国会制政府。

人与人之间的敌意已经被完善为一种极端的礼节，并正成为一种集体的感觉，以至于到了人们甚至以一种顽固的傲慢，不再相信他们自己和自己命运的地步。他们有时甚至于对一种最高的激情和结果来说，以一种不同于他们所想的方式来行动，或者说他们想的是一种方式，而做的是另一种。没有准备的观察家会把这误解为谦恭，或是他们称之为“奥地利特色”的一种弱点。但穆西尔说，他们错了，正如他们在用一个国家的公民的特性来说明这个国家的外观形象时，总是犯错误一样。事实上，除了与职业、民族、国家、阶级、地理、性别、意识、无意识以及隐私等相关的特性外，还有着第十个特性：未填补的幻想空间，它允许人们填充任何东西，除了那九种特性已表达的；或者换言之，它禁止人们去获取那真正可填充的东西。这种空间确实很难描述，但可确定的是：在意大利，它有着与在英国不同的颜色和形式，因为它们各自突出不同的色彩和形式，但它对于二者的共同之处在于：它是一个不可见的空洞的空间，在这个空间中，像一个房屋街区的小城镇这样的实在，被幻想取代了。

就这样，像今天人们所看到的整个世界那样，奥地利延续着，带着她消极的自由，带着一种认为人的存在并没有充分的理由的感觉。

人间的事情，甚至那些不寻常的事情发生着，事件和命运的打击就像羽毛和思想那么轻飘飘。 像今日的西方世界一样，奥地利充满天才人物，而这或许正是它衰落的原因。

玻尔兹曼在许多方面预演了 20 世纪知识分子的文化兴趣和失望：他接受了在他的国家居压倒趋势的这种局面，尽管他心目中的英雄确实不是什么皇帝和国王。

从政治观点来看，按照 E. 布罗达的看法，玻尔兹曼可以被认为是一位激进的民主主义者和一位顺从的共和主义者。 由此，他赞美他那个时代的美国(除了不容易找到葡萄酒这一点外)，人们可由前述他对于加利福尼亚之行的描述中看到这些。 在这些描述中，他坚持乔治 · 华盛顿及其追随者的斗争所具有的，不是一种局部的爱国精神，而是一种普遍的历史意义。 接着，他引用他所挚爱的席勒曾经说过的话，说："再有一千个如我者，德国将成为一个共和国，并直视罗马和斯巴达女修道院。"但他也不赞成席勒的这句话："显然，这不可能发生。 再有一千个人像你？ 这世界上甚至一个也没产生出来。""但思想不会死亡。"他接着说，并以美国为例："相形之下，令罗马和斯巴达成为女修道院的那个共和国，确实已屹立于大洋彼岸，她是多么巍然，她的成长是多么斐然！"并再次引用席勒的话作结："自由孕育着巨人"(见此书后所附的《一位德国教授的加州之行》)。

的确，维也纳当时是个相当自由的地方，当然也有着我们上面已引用过的像布伦塔诺的事例那样的限制。 回到奥—匈帝国的伟大心脏，围绕着那时设定的权力中心，生活着斯拉夫人、匈牙利人、意大利人、犹太人等等，即使是后者也能与奥地利人安然生活在一起。在有地产的贵族，常见的非常富裕的犹太中产阶级(他们的子女挤满了知识分子的人群)以及奥地利的马克思主义的社会主义者之间，有着广泛的接触。 但是权力掌握在，也必须保留在以哈布斯堡家族为首的贵族手中，并与一个非常刻板的教会，与军事集团，与最高层的

官僚，以及与集中化的金融势力紧密相连。当需要委派艺术和科学中的重要职位时，所选人选必须已经使自己并入或适应了这一权力。他可以是一个保守主义者，也可以是一个自由派，但肯定不能是一个激进分子。

一个有趣的问题是：在他生命的最后岁月里，玻尔兹曼是否认识到了新的文化发展的重要性。他确实知晓艺术的新趋向，如我们在第十章中将要引用的一个片断所表明的，他在那儿提到了与歌德和席勒大不相同的戏剧诗歌的方法，绘画中的印象派、脱离派、外光派，以及未来的音乐。在早期，或许为技巧和科学的新颖所迷惑，他只看古典派的画家，模仿歌德和席勒的诗歌，哥特和文艺复兴风格的建筑物，即主张艺术的符合论。但是，作为一个在文化史上不断重复自身的奇迹，在多年精神上的懒散停滞之后，一个小小的上升开始了。从一种像油一样平静的世界观中，一种令人精神振作的狂热正在欧洲各地兴起。人们站立起来，与过去作斗争。实践与理论正在交汇，伟大的思想正在浮现。他们彼此互不相同：他们热爱超人，也热爱弱者；他们赞美太阳和健康，也赞美患结核病姑娘的虚弱；他们坦承对于英雄的狂热崇拜，同时也热衷于社会主义；他们既是信仰者，也是怀疑者；他们崇尚自然，也讲究文雅；他们是强健的，又是病态的；他们梦境的特色是城堡边的旧时漫步，秋季的花园，平静如镜的鱼塘，珍贵的珠宝，麻醉品，疾病和恶魔，但也有着大草原，无边无际的地平线，锻炉和转磨，赤裸着的角斗士，被奴役者的革命和社会的毁灭。这些显然是矛盾的，是非常对立的呐喊，但他们都有一个共同的启示：无论是谁想分析这一时期，遇到的都会是荒谬，就像是一个由木的铁制成的方形的圆，但实际上每件事物都是一个片断，都有着些许意义。这种幻觉，物化于世纪之交的魔术般的日子里，是如此强烈，以至于有些人热情地急于闯进新世纪；而另一些人则徘徊于旧世纪中不愿离去，就像住在一幢无论如何得搬出的老屋中的人一样，但是这两种态度看上去并没有多大不同。上述变动不应

过分估计，因为它只发生于稀少易变的一部分知识分子中，并未永久地影响到大众。但确有某种东西正通过纷繁紊乱的信仰和信念，就像在同一阵狂风面前，有几棵树被吹弯了腰：一种分化和变革的精神，那种新的原理的快乐意识，一种青春的焕发，黎明破晓，一种小小的向春天的回归，事物只有在最佳时机才会发生。

在哈布斯堡王朝时期的奥地利，怀疑的和非正统的思想只能产生于上述官僚机构之外，产生于维也纳已成为不同文化的交融点这一事实，产生于其典型为上世纪末和本世纪初的简朴的公寓或咖啡屋里。人们或许会回想起西格蒙德·弗洛伊德(1859～1939)和心理分析，阿诺尔德·舍恩贝格(1841～1951)和12律音乐，“青春艺术风格”(新艺术)派，以《神圣的春天》杂志为中心的高层次的文学批评，卡尔·克劳斯(1874～1936)的和平主义和他的讽刺性的双周刊《火炬》，以曝光他所发现的腐败，等等。只有在这样的摇篮里，才会诞生出路德维希·维特根斯坦(我们已经提到过他)，后来以维也纳学派著称的新实证主义运动，或是像穆西尔这样的文学天才。或许在我们提及的名单中，克劳斯不那么为人们广泛所知，但他却是19世纪末和20世纪前30年维也纳生活的真正代表。为说明他的重要性，我们可以提到维特根斯坦非常崇拜他，提到舍恩贝格曾把一本自己著的伟大的音乐教科书送给他，并附以下述题词：“我曾从您那儿学到许多，或许已超过了一个人想保持自己的独立性，学习别人时所应有的限制。”

玻尔兹曼热爱自然，热爱艺术，但他的生活目标始终是他的科学世界。他在自己的著作《力学原理》开篇时的话，可以很好地描绘他对于科学的这种执着：

不懈地探求真理；
表达它力求清晰；
捍卫它直到你生命的最后一息！

他的实在论的和唯物主义的哲学立场，我们将在第十章考察。这一立场在社会主义者们那边得到了回应。的确，他关于理论的作用和进化论的见解(列宁赞许地引用这些见解，这使得玻尔兹曼在前苏联成了科学唯物主义的英雄)，如布罗达所注意到的，以一种独特的方式提示给我们那些恩格斯在他的《反杜林论》所表述的思想，尽管有众多的理由相信，玻尔兹曼不仅不知道这些思想，而且甚至于不知道恩格斯这个人的存在。阶级斗争这样的概念，在他的写作中全无踪影。在他看来，科学和哲学是单一的统一体，为一个更广泛的术语(在玻尔兹曼的用法中)“力学”所环抱。有时，这也不无尴尬，如在下述段落中：

> 像卡托、布鲁特斯和维里纳这样的人对于自由的挚爱，来自于由纯力学动因而成长于他们心灵的情感，我们也再一次地能够力学地说明，我们满意地生活在一个井然有序的君主制国家，也希望我们的子孙阅读普卢塔施和席勒，并从热情的共和主义者的言行中汲取鼓舞。这也是我们所无法改变的，但我们学会理解和承受它。上帝通过仁慈的国王颁布的法则，是力学的基本定律。

(我们注意到，似乎并没有一个叫维里纳的伟人存在过。这似乎是玻尔兹曼的《对公众的演说》中的一个不寻常的和奇怪的错误，可能与他的视力问题有关。这有可能是一个印刷错误，也可能玻尔兹曼在脑子里想指的是西塞罗的演说中所要反对的费雷斯，他被人称为维里纳)。

在大多数人的想象中，维也纳意味着斯特劳斯的华尔兹，咖啡馆，美味的糕点。但“啊，维也纳，梦想之都！没有任何地方能与你媲美”这样的词句，在穆西尔小说的第三卷中，却出自于一个疯子之口。在弗朗兹-约瑟夫的军队于萨多瓦为普鲁士所击溃(1886

年7月)的几周后，斯特劳斯把维也纳资产阶级的注意力从这一灾难性的事件上转移开了。我们习惯于把华尔兹看作是维也纳人享受生活的典型表示，但有许多报道表明，许多他的同时代人把他的音乐看作是非洲式的、色情的、享乐主义的、恶魔式的、好饮酒作乐的和危险的。

因此，在耀眼闪烁的表面下，是一个其成员不能对于外界开放他们自己的社会。再次引用穆西尔的话："那种认为像这样生活的人们，能够聚集在一起，来理智地安排他们的精神生活和命运的看法简直就是不现实的，是荒谬的。"

相应地，自杀的比例也非常高。其中最著名的案例发生于1889年，当时王储鲁道夫杀死了他的女教师巴伦尼斯·玛丽亚·维特塞拉，并自杀，这已成为众多浪漫文学的主题。这一时期的自杀者名单很长，除了玻尔兹曼和上述刚引证的例子外，还有路德维希·维特根斯坦的三个哥哥；奥托·魏宁格尔，他在这一悲剧性行为仅几个月前，刚刚发表了一本题为《性与特性》的天才著作；有抒情诗人乔治·特拉克尔；奥托·梅勒(古斯塔夫的兄弟，他本人是一位天才的音乐家)；埃尔弗勒德·雷德尔(于1913年)；以及爱德华·范·德·尼尔，他无法承受对于他所设计的皇家歌剧院的批评而自杀。

路德维希·玻尔兹曼的诗作

本节将专注于在本章第一节中提到过的"天堂里的贝多芬"这首诗。我们准备引用的英文本由罗尔利希翻译。如罗尔利希自己所说，他"不得不牺牲诗的韵律，以保证其意义和长短"，即使这样，他"有时也不得不依赖于一些自由翻译。只有在最后一段中，保存了韵律，以表明整首诗的韵味。"

玻尔兹曼称此诗为诙谐诗，它正是如此开头的。但人们不可避免地注意到某些事实，诗中说到玻尔兹曼灵魂的一次旅行，他离开了

他的身体，去往天堂。不必是一名心理学专家，就可从中看出一种（或许无意识的）死亡的欲望。而事实上，在最后一部分中，我们也看出了幽默突然转向的一个例子（从狂欢节到大斋期的过渡）：在地球上最为天堂里的灵魂所惦念的物体是痛苦的，并明确地提到了痛苦和悲伤的事例。

现在，让我们来更详尽的考察这首诗。它是这么开始的：

带着我不堪回首的痛苦
至少我的灵魂逃离了我凡世间的肉体。
扶摇直上，穿越空间！多么快乐的飞扬
对于一个曾为忧伤和痛苦所折磨的人。

最后的一句显然已不止是明显提到不幸和愁苦。但它们可以被认为是指人类生活的苦痛，这一解释似乎可由语调相当轻松的下一句得以证明，然而正如它的第二部分所表明的，全诗的基调却是痛苦和悲伤。

玻尔兹曼接着说，在上升中，他经过了其他世界的边缘，但却绝少观望，因为他有着更高的目标：天堂！而当他来到这儿，他听见了美妙的和声：天使唱诗班正在歌唱，但玻尔兹曼告诉他们，他们的歌在他听起来太单调：

他们大笑："你真是一个德国人的灵魂！
你的音乐艺术在这儿令人妒忌。
从'上帝赞美永恒'这首歌开始，
他就能看到我们在这儿能干什么，
但要看出这点我们就要同声合唱！"

最后一句在玻尔兹曼的家中是很熟悉的，因为他常与儿子一起演

奏。诗歌接着是天使们的“赞歌大合唱”。玻尔兹曼从中辨别出了贝多芬的风格，尽管其中的片断听起来是新的。于是他向天使们询问，他们告诉他这是贝多芬“因上帝的要求”而作曲的，是他们的歌曲中最好的曲子。于是，玻尔兹曼表达了会见贝多芬的心愿，以便他的旅行有一个好的目标。这样，他被引领着去会见伟大的音乐家的灵魂，而后者在说了几句欢迎之类的话之后，问他是否喜欢这首曲子。玻尔兹曼慌乱起来并保持沉默。贝多芬鼓励他说出自己的意见。玻尔兹曼坦承：他在天使们的合唱中，没有发现他在地球上时所体验到的同样的美。贝多芬同意玻尔兹曼的评价，并说他已停止作曲，因为他没有往常那么成功。只是因为“最后的审判”他才同意写了小号那一部分，“否则上帝会困恼的”。

为什么贝多芬被剥夺了创造性的火花？因为失去了最重要的音调，这一音调是由痛苦提供的！正是痛苦“带着威力回响，像钢铁一样共鸣，一旦它攫取了你，每一根纤维都会震颤。”于是，贝多芬列举了痛苦的事例，正是它使我们感觉到自己是人类：

“是什么力量使得母亲爱她的孩子？
无疑是无名的极度痛苦
多少个夜晚，她不断地为其所困
当只有她与上帝看护着孩儿。
你是否曾与你的妻子共同哭泣？
如果没有，你就把永结同心的纽带失去；
正是你们共同分享的苦痛
如你天使般徘徊于她的记忆。

经历了苦痛与悲伤的基督徒
赎救的光芒照耀着他的前途。
没有一个在世间享有盛名的英雄

未曾逼迫自己全力倾尽；
只有当这使得他的心灵疼痛直至颤抖
才会有不朽的赞歌颂扬他的英名。

基督本人如果在我们中留居
他会是一位国王，一位富豪，或是类似的人？
他也会是人类的子孙，为痛苦所烦恼围困！”

贝多芬确认，最具热情的生活方式是苦痛，这正是他创造他的音乐的基础。但是在天堂里，他缺乏热情，因为这儿没有悲伤。这就是他的结束的诗句：

在震憾中我凝视着他的脸庞。
“尘世间这些方式多么令人吃惊！
刚刚几小时前我还再次乞求死亡，
‘哦，让我的心摆脱折磨和苦痛吧’
但这里，在天上，苦痛却成了人们的渴望
啊，人们的心思，你的奥秘，永远无法懂得。”

玻尔兹曼的个性

对于玻尔兹曼生活的描述，包括其普遍存在的幽默和抑郁的主旋律，以及相关的对于他的科学理论的热情，总是处于完全的成功和根本的失败的边界上，表明这位伟大的思想家有着一个不寻常的缺陷，而这正是一种非常人性化的敏感性的结果。我们已经看到了他几乎是孩子气的对于科学问题和发明的着迷，他的脆弱，在与他的妻子和孩子的关系上的敏感的个性，他与同事和学生相处时爱交往和爱娱乐的特性，他所受到的广泛的教育和广泛的爱好：音乐、文学、大自

然，当然还有着科学的方方面面。

今天，在阅读了他的信件之后，除了采用赫夫勒希纳首先指出的他内心最为隐秘方面的画像外，我们别无选择。这是物理学的最伟大的英雄之一的画像，用赫夫勒希纳本人的话来说，这“看起来是刺激人的，有损声望的，是对他人格的一种贬低”，因为“我们的玻尔兹曼的画像是……模糊的和矛盾的，正如他的个性是十分矛盾的，难以为他的同时代人所理解。”

这为我们提供了一个线索，去理解这样一个事实：他的工作只是通过其他某人的介绍描述才为人们所知，而他原初的论证和论文则似乎为人们所遗忘了。在某种意义上，他是个令人烦恼的人：爱写长篇的论文，总想为捍卫他的优先权和自己观点的正确性而斗争。

玻尔兹曼个性的重要特征是心理上的不稳定，他自己所开的他出生于狂欢节和四旬斋之间的夜晚的玩笑，刚好描述了他的这一特性。正是这种不稳定，最终导致了他的自杀。他的信件，甚至他的科学论文和书中的某些语句，都给我们以一个充满焦虑、渴望完美的人物形象，一个为其科学生命的每一段里程所证明的形象，此时的他，正是一位充满了创造性，成功而且幸运的教授，一切对他而言都很完美。由于早期的成功，他感觉自己是一位不为同时代人所理解的伟大的人，但偶尔也会觉得，他无法始终保持这一图像的水准。在我们的眼中，他的这一薄弱点，使他更接近一位常人，而不是物理学史上的英雄。当这些弱点表现出来时，恐惧、痛苦和抑郁的感觉就占了上风。此时，他通常是试图去旅行，去会见新人，去使他的理论更广为人知。因此，就有了他最后18年的不得安宁。在生活的这一阶段，他表现得好像并非出于理性的和正常的思考。如为几位作者所强调的，他的某些搬迁可能是出于他妻子对自己未来的考虑，因为他身体和心理上的健康在不断恶化。但即便如此，人们也会争辩说，他应当更审慎地考虑自己决定的后果。

他的心态的演变，几乎可以从他的照片中解读出来。从一位以

友善的目光注视着我们，相信我们会理解他的重要性的年轻的教授，到后一时期，在看上去不可避免的年纪的变化之外，似乎他有些害怕周围的世界：他不再看着我们，也没有看着周围的世界，而是用一种为生活击败的人的游移的目光，看着某种不确定却很吓人的东西。他所挚爱的诗人席勒的诗句在年轻时肯定激励过他，给他以勇气和信心去攻克最困难的原子论问题，并以一种根本的方式去解决它们。在他生命的最后岁月里，这些诗句依然伴随着他，不过是作为与一个他觉得已是不相干的和异已的世界的残存的联系罢了。

我们可以把他的自杀看作是他生命的不可避免的归宿，就像古希腊悲剧中的天数：最后的、极端的一着。用赫夫勒希纳的话来说："这一次，他没有违背自己的诺言，最后一次变换了大学，然而进入了一所以不朽的科学巨人为成员的大学。"

第二章

玻尔兹曼之前的物理学

从伽利略和牛顿到早期原子理论

当玻尔兹曼开始其对物理学的贡献时，物理学正处于什么状态呢？ 这个阶段的物理学有两个彼此矛盾的特征：一方面，没有人会怀疑牛顿在伽利略的概念和方法两方面的具有洞见的创新之后，所建立的基本结构；而另一方面，在热力学和电动力学等新领域里所做出的新发现，正缓慢地改变着这座给人深刻印象的大厦，使得其内在的矛盾或早或迟将浮现出来。

本章旨在描述玻尔兹曼开始其研究之前，物理学所处的状态。这种描述当然不会是面面俱到、笔墨均衡的，因为我们首先考虑的是那些与玻尔兹曼的工作联系更为密切的方面，并强调那些隐藏在巨大成功背后、刺激着新的发展的困难。 即使这样，有些感兴趣的材料

也不得不省略，以保证本章的长短处于可接受的范围之内。我们当然会提到伏打(他用他的电池不仅改变了物理学，同样也改变了化学)、奥斯特、法拉第(他发现的现象奠定了电力的生产、分配和使用的基础)，但我们不会在这些问题上详加探讨。我们会更多地讨论热力学，因为由改善蒸汽机和电动机的效率的需要而激发出的理论发现，与玻尔兹曼的主要研究方向是密切相关的。

为了阐明那些有关他那个时代中取得的新成就所引发的争论，玻尔兹曼在某种意义上应被看作是最好的见证人和最重要的科学家。一方面，他是关于自然的力学解释这一伟大传统的坚定的继承者；但另一方面，可以说，正是在他自己手中，他眼看着自己多种多样的研究主题改变了它的面貌。

他看来已清楚地意识到了这种情形。在慕尼黑自然科学家会议(1899 年 9 月)上的致词“论近年来理论物理学方法的进展”中，时年55 岁的玻尔兹曼在考察了他作为一名科学家开始其职业生涯时的情形后，毫无保留地说：

> 这就是当我开始我的研究时，理论物理学所处的发展阶段。自那时以来，发生了多少变化！的确，当我回顾所有这些进展和革命，我感觉就像一个古老科学回忆的遗物。我愿意再进一步，说我是惟一仍以无保留的热情，抓紧老的学说不放的人，惟一无论如何仍尽我所能为捍卫它们而战斗的人。我把下述这点看作是我人生的任务：尽可能清晰和逻辑上有序地构造经典理论成果的体系，以确保大部分我认为包含于其中的有价值的和持久可用的材料，无需再于某天被重新发现，这样的事情在科学中已屡见不鲜。
>
> 因此，我将在你们面前将自己表现为一个反革命的，总是滞留于后、对古老的经典传统保持着热情而反对今日的人们的人；但我不认为我是一个思想狭隘，或对新思潮的进展视而不见的

> 人；我将在我讲话的下一部分中，尽我所能公允地评价它们；因为我十分清楚，像其他人一样，我所观察到的事物必然会为我主观的眼睛所濡染。

现在，让我们来考察在19世纪末已然是陈旧的和经典的科学知识主干。依赖于先前许多学者的工作，伽利略·伽利莱(1564～1642)和伊萨克·牛顿(1642～1727)创造了一个作为近代科学起点的体系。牛顿为这一体系中加进了他自己的作用与反作用定律，赋予含糊不清的力的概念以准确的意义。在天体运动的研究中，通过把天体模型化为质点，即被赋予了附加的惯性性质(为质量概念以定量的方式所表达)的数学点，他得以取得了特别根本和成功的成果。借助于关于两个质点之间的开普勒定律所提供的实验证据，牛顿假设了一种吸引力，它沿着连接两点的直线方向，反比于它们相互之间距离的平方。假设同样的力作用于组成任何物体的两个给定质点之间，并运用得自于对地面物体观察的运动定律，牛顿成功地推导出所有天体的运动，与地面相邻的物体的重量，以及潮汐理论。

面对这些异常的成功，牛顿的继承者们致力于运用同样的方法，即仅仅引入适当的修改和添加来进一步说明自然现象。因此，通过复活一个古老的由德谟克利特于公元前5世纪引入的假说，他们想象物体是无数原子的集合。这也部分是遵循了牛顿本人的思想，因为在他的《光学》中，牛顿说：

> 在我看来，上帝在最初造物时，可能使用的是固态的、有质量的、坚硬的、不可穿透的和可动的微粒；这些微粒的大小、形状、所拥有的其他性质、在空间中的比例等等，都最适合于他造物的目的；这些固态的初始粒子无比地坚硬于由它们构成的多孔的物体，坚硬到绝不会磨损，不会破碎成小块；任何普通的力量都不可能把上帝在第一次创造时的初始粒子破开。

然而，他的继承者们开始思考，在作为质点的原子之间，除了牛顿的引力之外，至少存在着另一种力的作用。然而，这种力的本性和性质是神秘的。

伽利略和牛顿的追随者们在长达一个多世纪的时期里，忙于应用他们的思想和工具，试图用牛顿构建得如此清晰的基本定律，来说明所有的物理现象，从而催生出物理学中后来被名之为力学的倾向。追随伽利略和牛顿的脚步，这种倾向是古希腊哲学家原子论思想的自然发展。按照这种世界观，物理宇宙由其初始要素遵循可理解的规律，并可用数学术语写出的物质来构造。简言之，除了最为复杂的微积分方法，它是伽利略在其著名的《关于两大世界体系的对话》中所概括的纲领的全面发展：

> 哲学被写在这本宏大之书上——这里我指的是宇宙，它在我们的凝视面前持续地展开着，但除非人们能学会它藉此写成的语言和符号，否则就无法理解它。这本书是以数学语言写成的，它的符号是三角形、圆和其他几何图形，没有这些符号，人类就不可能理解它的只言片语，没有这些符号，人们就只能在黑暗的迷宫中徒劳地摸索。

这说明了为什么数学在近代科学的起源中扮演了如此重要的角色。与物理学概念的构造同步发展的微积分的思想，对于本书内容的合理的理解是必不可少的。

关于这种早期原子理论的最为系统、且产生了一些有趣结果的专题研究，是由罗杰·约瑟夫·博斯科维奇(1771～1787)做出的。他的大量的研究成果实际上涉及到他那个时代的科学与文化的每一方面，但这项旨在以统一的模型来理解宇宙的研究，或许是他研究水平的最高点。在此书中，点质量之间的力被想象成在某些距离时是排斥的，而在另一些距离又是吸引的，以适用于说明已知现象(见图

2.1)。被说明的基本事实有：粒子的不可穿透性；固体在低温时有一平衡态体积；这样的物体会变化为具有更大平衡态体积的液体；以及已非常确定的任何两个物体之间有着平方反比的引力作用的情形。

让我们在这儿停一下，来介绍这位尽管鲜为人知、但在19世纪却被广泛引证的科学家的生平和工作。博斯科维奇是一位典型的18世纪物理学家，我们之所以用专门的篇幅来介绍他，不仅因为他是第一位在牛顿力学的框架中，试图发展出系统的原子理论的人，而且也因为他对于19世纪的伟大的物理学家，例如法拉第、奥斯特、开尔文勋爵等施加了极大的影响。然而尽管这样，尽管他的著作的英文版于1922年就已问世，他实际上已被生活在20世纪之初的伟大的科学家们所遗忘，这一点为马克斯·玻恩(1882～1970)的诺贝尔获奖演说中的下述语句所验证："开尔文勋爵经常引证博斯科维奇神父为首先运用原子论思想来解决物理问题的人之一。他生活于18世纪，当时可能还有其他人有着类似的思想，但关于他们**我一无所知**。"(黑体为我所加)

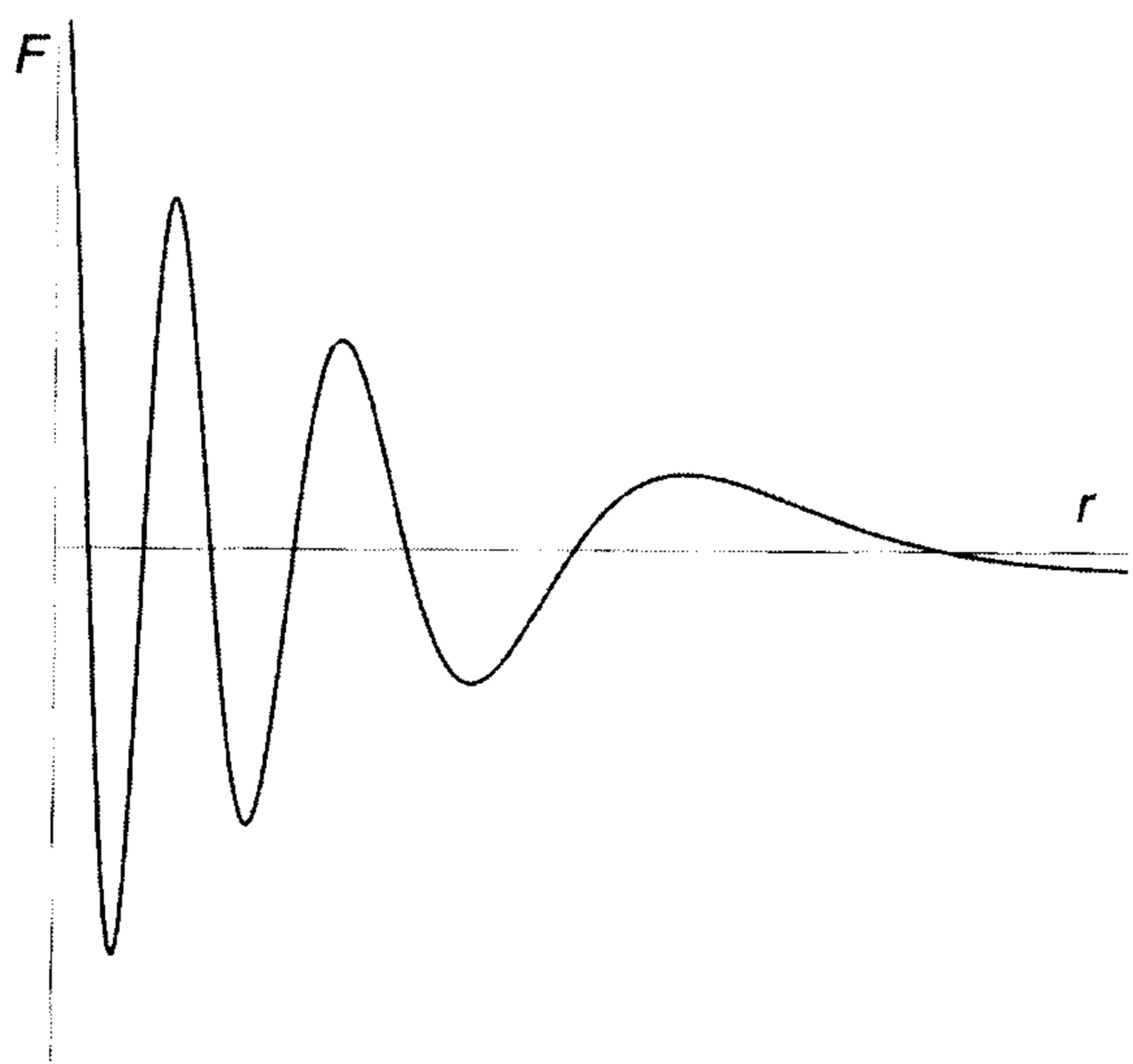


图2.1　博斯科维奇所认为的原子间的力。

博斯科维奇所提出的雄心勃勃的理论试图概括他那个时代的已知知识，因此是在单一原理下统一不同物理现象的一个早期范例。此外，这个原理不是建立在物质，而是建立在一个充满空间的力的系统基础之上的，从而使得物质的分离存在几乎不再必需。这就与伊曼纽尔·康德的世界观联系起来，康德曾提倡物理系统的构造应基于吸引力和排斥力(《自然哲学》)：原子即使存在，也不过是力的中心，而不会有单独的存在。

博斯科维奇的工作的重要性在于这一事实，他是第一个提出了某种在今天看来或许无足轻重，但在当时却并非如此的理论的人。关于这一点，去看看18世纪末和19世纪初的某些其他研究就足够了，这些研究可以使我们认识到，它们的作者看来认为原子的本性在气体、液体和固态应当是不同的。例如，伟大的皮埃尔·西蒙·拉普拉斯(1749～1827)的原子间的短程吸引力说明了诸如表面张力、毛细作用、固体和液体的凝聚力等现象。他也运用热质粒子理论(见下面)来说明长程斥力，他认为这对于说明气体行为是必需的，但他没有如此地来定量地形成他的理论，使得它可能为实验所检验。特别是他在理想气体定律的推导中，忽略了伯努利的基本思想(见下面)，与先前由牛顿提出的一条定理相冲突，按此定理，在任何这类说明中，长程斥力必须与距离的平方成反比。拉普拉斯的力与我们今天所假设的原子之间的力(除了引力外)正相反，即原子之间的力在远距离时吸引，而在短距离时是强烈排斥的。而在许多年里，拉普拉斯理论为毛细现象提供了最佳说明，直至1883年为范德瓦尔斯的理论所取代。

让我们回到博斯科维奇。他生于达尔马提亚(它现在是克罗地亚的一部分，当时是威尼斯共和国的一部分)的杜布罗夫尼克(当时称为拉古萨)，是一位商人的儿子。尽管他的母亲是意大利裔，他从未用塞尔维亚-克罗地亚语(南斯拉夫大多数地方共同的语言，克罗地亚人用拉丁字母，塞尔维亚人用西里尔字母：这是这两族人之间除宗教外的另一区别，否则就成了同一族人)写过任何东西，博斯科维奇的家

庭是纯塞尔维亚血统。他曾为自己的斯拉夫民族自豪。在一次与达朗贝尔的争论中，达朗贝尔称他为意大利人，他说："这里，我们首先应注意到我们的作者是来自拉古萨的达克马提亚人，而不是意大利人；这也是为什么马鲁塞利在最近关于意大利作者的工作中，没有提到他的原因。"在一首题献给法国国王路易十五的关于日蚀的诗中，博斯科维奇在供奉的诗文中对他的出生地大加赞颂。他是他那个时代公认的科学权威，是耶稣会团体的成员，在罗马学院教授数学直到1760年。在那一年，我们发现他到了巴黎，由于他的科学声誉而受到极大的尊敬，尽管他的耶稣会团体在法国是被禁止的。然而，他在巴黎的感觉不是太好，于同一年前往伦敦，在那儿受到热烈欢迎，并成为皇家学会会员。皇家学会委派他前往加利福尼亚观察金星凌日，但他不愿去，结果被派往君士坦丁堡(现在的伊斯坦布尔)执行同样的使命。他未能及时赶上观察，而等他真到了那儿，他又病倒了，于是只好在君士坦丁堡呆上七个月。然后，在经过色雷斯、保加利亚和摩尔达维亚的长途旅行(他在他的《从君士坦丁堡到波兰的旅行》一文中作了描述)之后，他到了华沙。1762年，他回到罗马，没多久即获得在帕维亚大学的一个教席。从1764年起，在米兰的布雷拉天文台的建筑就已按博斯科维奇的计划开始建造，他于1770年被任命为天文台台长。然而不幸的是仅仅两年，他就被奥地利政府(当时在它的统治下，伦巴第人来了)剥夺了这一职位，并让另一位耶稣会会士拉格朗日牧师来担纲此职。他的职位因教皇克莱门特五世镇压耶稣会而更趋复杂。于是博斯科维奇再赴巴黎，在那儿成为法国臣民，并担任法国皇家海军光学研究所所长。

在法国，他曾与达朗贝尔、罗尚和拉普拉斯等辩论，但也有着忠实的朋友和崇拜者，著名的天文学家勒兰德，我们从后者处得知许多关于他的性格和习惯的详情。特别是如我们已知的，他写诗，而勒兰德关于这一能力有着一段准确的评论："博斯科维奇只用拉丁文撰写诗句，但他的创作极其容易。在交际场合，他很少会不为席间的

名人或是有魅力的女士献上匆匆写就的即兴诗句，而对于女士而言，他的兴趣也只止于此，他的严谨稳重总是堪称楷模。”在一次前往意大利指导他的五卷本的光学与天文学著作的印刷途中，博斯科维奇病倒并逝世于米兰。

在公共事务方面，博斯科维奇也有着大量的工作，作为教皇的外交官和顾问，需要他关心的主题极为广泛，从庞廷湿地的开垦，到意大利半岛大小的测量，直至罗马的圣彼得大教堂穹顶的稳定性问题。

在博斯科维奇之后，力学并未消亡。事实上它在19世纪更为繁荣，不过它走上了几条分叉的路径，导致了关于自然的更为混合的观点。这一进程在20世纪仍在继续，并对经典观点的局限性有了更为清楚的认识。

尽管博斯科维奇在科学史上有着重要的地位，他的观点却不足以说明已知的现象，因此玻尔兹曼在一封发表于《自然》(英文版)的信中，明确地反对这些观点。这封信的目的，是为了澄清他关于原子存在的假说在物理学中的地位的观点，特别涉及到气体运动论问题。下面是玻尔兹曼论文中的某些语句：

> 长期以来，博斯科维奇的著名理论是物理学的理想……如果这一理论对所有现象适用，我们距福斯特公式所希望达到的目标，即认识所有事物仍有很长一段路程。但困难……将仅是一个数量上的问题；自然仍会是一个困难的问题，但对人类心灵来说不再神秘……博斯科维奇的这一简单观念为科学的每一分支所拒斥，气体理论也不例外。假设气体分子为博斯科维奇意义上的质点的聚集体，与事实不符。

这里，玻尔兹曼指的是一个原子不是简单客体这一事实，这一点在他的时代已由光谱学而充分了解。正是关于这种结构的研究铺平了通往20世纪基本粒子理论的道路。这些基本粒子是建造原子的砖瓦，正是从

它们中，或许可以导出博斯科维奇所想象过的原子之间的力来。

我们也必须注意到，博斯科维奇也是第一个断言严格决定论的人，尽管为自由意志认可了某些空间。值得引用他发表于1763年的书中的下述段落：

> 任何物质的点，当听任它作由任意意愿引起的自由运动时，必然描绘出某种连续的曲线，其确定可归结为下述一般性问题。给定一定数量的质点，并对每一质点给定它在任一瞬间所占据的空间点；同时，给出它们初始运动的速度和方向，如果它们即将发射的话，或是给出它们的切向速度，如果它们已经在运动的话；并给出如图2.1所示(它所包含的是我的理论)的用连续曲线表示出的力的规律；要找出的是每一质点的路径，即它们中的每一点循此运动的路线……现在，尽管这类问题超越了所有人类智力的能力，然而任何几何学家此时都能轻易地看出，这个问题是确定的，这样的曲线是连续的……一个具有必需的能力的理智，能以一种适当的方式来处理这样的问题，并有足够的才华来领悟它的解(并且这样的理智甚至于可以是有限的，如果质点的数目是有穷的，并且表征力的规律的曲线为一有限表征给出的话)。我认为，这样的一种理智，能够从无论多么小的时间间隔所描述的一段连续曲线中，从所有的质点中，推导出它自己的力的规律。现在，如果力的规律已知，且已知所有质点在任一给定瞬间的位置、速度和方向，这种理智就有可能预言所有必然的后续运动和状态，预言所有必然随之而来的现象。

这可以与拉普拉斯的那段名句(写于1814年)相比较：

> 因此，我们必须把宇宙的目前状态看作是其先前状态的结果，并且是以后发展的原因。如果有一种智慧能了解在某一瞬

间支配着自然界的所有的力，了解组成自然的所有存在物各自的状况，并且具有解析这些所给条件的巨大能力的话，那么他就有可能用同一个数学公式概括出宇宙万物的运动，从最大的天体到最小的原子，都毫无例外；那么对它而言就没有任何不确定的东西，未来就像过去一样，一目了然。

热与机械能之间的第一次联姻

沿着标准的牛顿的进路，在伽利略的落体运动定律、处理碰撞运动问题和克里斯蒂安·惠更斯对复合摆运动的研究等的推动下，微积分的当代应用，业已表明了另一个量的重要性，这个量后来被普遍称之为能量。每当一个点质量在一个力的作用下，沿着这个力的方向运动了一段长度，人们都能观察到一个量的增加，这个量依赖于质量和速度，今天被称为运动能。像重量的情形中所表现的那样，当力以同样方式作用于一个物体的所有粒子，这个量就明显增加。而在摩擦或碰撞的情况中，如果只有部分粒子受某个力的作用，如在摩擦或碰撞的情形中所表现的，这个量就趋于减少。在所有后一种情形中，热量总是要产生的。到18世纪末，在化学家的著作中明显地，热被当作是一种物质，并被伟大的法国化学家安托万·劳伦特·拉瓦锡(1743～1794)命名为热质，拉瓦锡也首先致力于把伽利略和牛顿所奠基的物理学的方法和概念引入化学。作为一种物质，热既不能创造，也不能消灭，被认为是无重量的，自相推斥的，而它被假设为被通常的物质所吸引，它能穿透这样的物质，并以这样一种方式，占据这种物质的微小粒子之间的空间，使得这些粒子抵抗彼此之间的引力吸引。摩擦被简单地认作是挤榨出了这种潜在的热质，释放了它们，并导致了通常所经验到的热。这一理论对于所有已知的热的性质，至少提供了一种定性的说明。

在18世纪的最后10年中，本杰明·汤普生(1753～1814，出生

于美国，但后来改成德文名，即康特·伦福德）在为巴伐利亚选帝侯制造火炮的镗孔过程中，发现要消耗大量的机械能，同时产生出大量的热量。伦福德意识到在机械能的损失和产生的热之间有着直接的关系。于是，他提出一种假设：以往被认为是物质实体的热，实际上不过是物体中最小粒子的彼此之间相互碰撞的无规则运动。这一运动无法被直接观察，因为粒子自身是不可见的，然而这一微观运动能为我们的神经末梢的粒子所觉察，产生出热的感觉。换言之，他所提出的是把机械能守恒原理推广到所有现象。

人们可以追溯到在伽利略的《关于两门新科学的对话和数学论证》（1638年）中，已经有了这一原理的初步观念。当时，他正思考能量的涵义，以限定在落体运动的基础上，来证明惯性定律。他的论证基于这一事实，即无论物体沿着什么样的曲线下落（不计摩擦），它都必须准确地达到同一速度，这一速度为它再次爬上下降时的起始高度所必需；否则，就有可能构造出永恒运动。

要说明伽利略的考虑不太容易，这是一个大胆假设和精巧论证的结合，但我们可以来试试看。伽利略的一个不那么为人所知的发现，是在没有摩擦的情况下，那些基本定律应当是时间上可逆的。这一结果当然仅限于引力，这是他惟一曾思考过的力（外在于被作用的物体）。他由一个单摆的简单情形开始。如果人们观察一个振动着的摆，可能会奇怪为什么它会运动，为什么它最后停下来了。运动当然是由引力引起的，如果没有摩擦，它会永远不停地摆下去。这样我们就可以像伽利略所做的那样，去思考没有摩擦的理想情形。于是显然，摆运动的两半是对称的，对于一个给定高度，两个对应于这一高度的速度是相等的。如果一个质点运动在两个斜面上，同样的情形也会发生，每一点都是另一点相对于垂直面的镜像（为避免两个面在此相交的拐角问题，我们可设想抹去它）。于是伽利略假设运动在垂直和水平方向的运动是彼此独立的（这对我们而言是无关紧要的），并得出结论说，如果我们改变了一个面的斜率，在同样高度的

速度会保持不变。事实上，让我们假设在下落中达到的速度，会大于它再次爬到另一面上的起始高度所需要的速度，那么就有可能持续地增加它的速度，通过在它已达到起始高度时，阻碍它的攀升，用一个类似的安排，周期性地重复，让它滑下然后上升。如果相反，速度在下降时减少，我们同样可以构造一个增加速度的永恒运动，通过假设的关于时间可逆的对称性来反转运动。

于是，所考虑的物体能爬上任何斜率的斜面，斜度愈小，物体走得就愈远。其极限情形，即在平面上以恒速的无穷运动留给读者自己去想象。这一省略可能并非偶然，而是蓄意如此的，以回避考虑在球面的地球上的无限平面问题。

在伽利略之后，作为他的发现和原理的明显的后果，发展起了被假设为不变的质量的概念，以及第一个有关碰撞的理论，即使还限于正面的碰撞。相关于这些研究，勒内·笛卡尔引入了动量，并坚持这个量基于形而上学的和神学的思辨是守恒的。然而，缺乏把速度看作是矢量的观念，使他无法得出正确的结果(尤其是他无法说明在正面碰撞的情形中，相关速度分量的正负号)。

在一篇写于1669年的论文[其证明只是到他发表于《遗著集》(1703)的文章《论碰撞产生的粒子运动》中才出现]中，惠更斯表明，他不仅已经理解了动量和(带有正确的符号)在弹性碰撞前后保持为相同的值，而且也懂得了质量与相应的速度的平方乘积的总和，在碰撞前后也保持不变。值得注意的是，这些定律中的第一条，是通过伽利略相对性原理，从第二条中推演出来的：事实上，惠更斯运用了一个思想实验，想象自己站在河岸上，观察一个发生于运动中的船上的碰撞，而得出这一推论。然而，第一个发表了关于能量守恒的结果的科学家是戈特弗里德·威廉·莱布尼茨(1646～1716)，他从惠更斯那儿学到了许多，在他发表于1695年的这篇论文中，他批评了笛卡尔的错误。莱布尼茨称运动能为**活力**，以与**死力**，即通常的力相对立。同样值得注意的是，莱布尼茨用到了**潜力**一词，它首次包括了势能(至

少在重量的情形中)。以下是他对由他的概念而引出的批评的回答:

> 我坚持世界上的活力是守恒的。人们对此的批评是在两个松软的或非弹性的物体的碰撞中,它们的[活]力会有所损失。我的回答是:情况并非如此。确实,物体作为一个整体,就它们整体的运动而言有所损失,但它们的部分获得了它,因为碰撞强度创造出了内部的搅动。因此,这一损失只不过是表观的。力并没有被消灭,不过是消散在最微小的部分中。并不存在力的损失,整个事情的进行,不过像某人想把一个硬币弄成碎片一样。

在1696年1月15日写给马奎斯·德·劳斯皮特的一封信中,莱布尼茨看来几乎已预言了未来的物质结构理论的纲要:

> 你可以看出,原因与结果之间相等的原理,即永恒运动的排除,是我的力的测量的实质。由于这一原理,这被保存在一个不可改变的相等之中,即总有着一个量的守恒,正是这个量用以来产生一个确定的作用,来提升一重物到一确定的高度,来拉长一根弹簧,来传递一个确定的速度,而这样的作用既不可能有最少的获取,也不可能有最少的损失发生;尽管无疑,会有一部分这种力,会有人们决不会忽略不计的一部分,被物体本身或周围环境的不可感知的粒子所吸收。相反,并无动量在自然界中守恒的证据。对于我们在自然界中能观察到的物体而言,经验与动量守恒的假说相矛盾。我们的理性并没有表现出任何证据,以承认在物质的不可感知部分中的这种守恒,而我们总是必然假设在这儿有着与可感觉和可见的对象有着同样的作用,除了在大小上有差别外。然而,就这些对象而言,我在这里所坚持的意见,并非明显地基于关于碰撞的实验,而是基于一些原理,这些原理正是用以说明这些实验的,并允许我们用以来判明那些尚未

进行过实验，或尚未形成定律的情形，而这些原理的惟一和独有的源泉，就是原因与结果之间的相等。

莱布尼茨的思想为约翰尼斯·伯努利(1667～1748，他引入了“能量”这一术语)和伦哈特·欧拉(1707～1783)所普遍化和系统化，而丹尼尔·伯努利(1700～1782)则是第一位重建伽利略与惠更斯之间的联系的人，却避免了任何形而上学的考虑。

丹尼尔·伯努利(我们在下一章还要更多地说到他)是一种新的时代潮流的开创者，在这一时代中，科学家都忙于改进牛顿的方法，以使它们更加精确，更加优美。约瑟夫·路易斯·拉格朗日(1736～1813)的工作可看作是这种努力的杰出代表，他为写出在给定力作用下的任何由质点和刚体所组成的任意复杂系统的运动方程，提供了一种系统的技巧。

热力学的春天

“功”的概念和术语，出现于与19世纪初发生于法国的应用力学的巨大发展的联系中，而关于这一巨大发展，我们要感谢拉扎尔·卡诺(1753～1823)这位法兰西革命中的“胜利的组织者”，感谢古斯塔夫-加斯帕德·德·科里奥利(1792～1843)和让-维克多·庞塞莱特(1788～1867)。

人们可能会期望，伦福德的实验工作和所有我们刚才描述的理论思索，应当已确立起热不过是能量的一种形式的观点，然而热质说对于18世纪末和19世纪初的科学家们有着强烈的影响。当伦福德指出，在他的火炮镗孔实验中热的产生实际上似乎是无穷无尽的时候，热质说的支持者们回答说，在金属及其环境中，总是有着足够的热质，能从潜存转化成自由态。

我们必须强调这一事实，地理学家，尤其是詹姆斯·赫顿(1726～1797)反对由乔治斯-路易斯·莱克勒克和康特·布丰(1707～

1788)提出的地球逐渐冷却的理论。尽管布丰的论证和实验室的实验按照当时的知识是无懈可击的，赫顿评论说一种“地下火”必然“在这些时代里生机勃勃地存在着”。今天，我们知道他是对的，尽管有着直到20世纪的许多著名的和不那么著名的批评(最著名的是开尔文勋爵)。能量的源泉由放射性提供。

我们不知道赫顿是否为他朋友詹姆斯·瓦特(1736～1819)的蒸汽机所影响，以及他的思想依次在多大程度上影响了其后物理学的发展。

然而，感谢工业革命和蒸汽机的制造，学术争论中出现的问题，已成为一种实践中的必要性，不仅为人们所广泛感觉到，而且必须进行实验检验。所产生的热必然总是严格地正比于运动能的损失，这一理论推论已为詹姆斯·普雷斯科特·焦耳(1818～1889)于1839年至1843年间的著名实验所确证。焦耳生于曼彻斯特，这里是英国第一次工业发展的心脏，他以关于电动机的效率为题开始研究，以利用这种由亚历山德罗·伏打发明的电池所提供的新能源。

能量与热之间的等价原理为尤利乌斯·罗伯特·冯·迈耶(1814～1878)所阐明。迈耶是一位生理学家，早在1841年就试图就此论题发表一篇论文，但为波根多夫的《物理学化学年鉴》所拒绝，原因是尽管有着伟大的直觉，迈耶的物理学却很差，他所使用的个人的俗语确实为大多数物理学家所讨厌。直到他死后的1881年，这篇论文才重新取回发表。1842年，他写出了一篇新论文，表明他的物理学有了极大改进，和他掌握的今天我们称之为动能和势能的概念的能力。对于机械功与热之间的比例常数，他给出了一个相当精确的值，并正如仅仅三年后他所揭示出的，是基于理想气体不同比热(定容和定压)之间的差别。值得注意的是，迈耶对于这一问题的兴趣，来自于当他作为一次前往东印度的旅行的随船医生，观察到的静脉血液的颜色的变化，及随后他所研究的能量在生物现象中的作用。这里，他很自然地趋于引入马力来作为功率的单位，并且当研究氧化反应在肌肉中的作用时，说血液“是一种缓慢燃烧的液体，是生命火焰中的油”。

他也试图说明太阳中热的产生，并正确地得出了化学反应远远不够的结论。在不会想到核反应的情形下，他提出了一个非常稀奇和可反驳的说明，立足于大数量的流星落到太阳上。此文1846年寄出，未能为巴黎科学院所发表，而是在修改和扩充后发表于1848年。

现在，回到原子理论，19世纪早期的科学家对此有着明确的见解。我们可以用玻尔兹曼的话来概括它们：

> 人们进一步预设在固体中，每一个粒子都围绕着一确定的静止位置振动，而这些静止位置的位形则决定了这一物体的固体形状。在液体中，分子运动非常活跃，粒子彼此相向蠕动；蒸发于当粒子整体从物体表面分离时，因此在气体和蒸汽中，粒子大多数都以直线飞离，就像子弹出膛时一样。这就以自然的方式说明了物体的三种聚集态的发生，以及物理学和化学中的许多事实。从许多气体的性质来看，它们的分子不可能是质点，因此假设它们是这种点的复合，或许为以太层所环绕。

除了组成物体的可估量的原子外，事实上也假设了第二种物质的存在，它由更精细的原子——发光的以太组成，人们按照奥古斯丁·让·菲涅耳(1788～1827)大胆的理论，通过假设以太的横向规则振动，成功地说明了几乎所有涉及光的现象(在为牛顿的追随者所青睐的光的微粒说被抛弃以后)。有些困难仍然存在，例如在传光的以太中，完全没有纵向的波，而这些以太不仅存在于可估量的物体中，而且实际上在固体中居支配地位。菲涅耳的以太不得不被假设为稀薄的，同时又是刚硬的，不具备任何已知物体的力学性质。

1796年，当拉扎尔·卡诺正位居法兰西指导委员会成员时，他的长子尼古拉斯·萨迪·卡诺(1796～1832)出生了。几年以后，拉扎尔当上了陆军部长，当他去拜访拿破仑时，经常带着他的小儿子萨迪一起去。有一次，拿破仑正在向湖中一艘船上的一群女士(包括他自己的妻子在内)的周围扔石头，以溅水取乐，这位小男孩冲上前

去，对他大声喊道："你这个讨厌的第一执政官，停止戏弄那些女士！"拿破仑大笑，而对科学史并没有什么严重的后果。直到他24岁那年，萨迪·卡诺投身于研究，并在军队中成为一名军官。此后，他开始拿半薪，并着手研究具体的物理学和经济学问题。当拉扎尔1823年去世时，萨迪与弟弟希泼莱特在一个小公寓中安了家，在这儿开始了他开创性的工作，铺平了通向新的学科——热力学的道路。这本非凡的小册子所用的语言中，一部分仍然是把热作为一种物质，但所持的是一种小心的和批评的方式。接下来，卡诺承认热的力学理论的情形，为若干笔记所广泛证明，这些笔记在他死后的1878年发表。事实上，在一次疫病流行中，他患上了霍乱，死于36岁。在这些笔记中，我们可以读到：

> 我们被允许在这儿表述一个关于热的本质的假说。
>
> 目前，光通常被看作是以太流体的振动运动的结果。光产生热，或至少伴随着辐射热，并以像热一样的速度一起运动。因此，辐射热是一种振动运动。设想它是一种物质的发射是荒唐可笑的，而伴随它的光只能是一种运动。
>
> 一种运动(辐射热的运动)能产生出物质(热质)吗？
>
> 无疑不能，它只能产生运动。于是，热是一种运动的结果。
>
> 于是，事情很清楚，热能为动力的消耗所产生，也能产生这种动力。

当阅读这段笔记时，今天的读者不可避免地会想到，类似的思考可能也曾在爱因斯坦的脑海里进行过，在大约80年之后，当时他得

出了相反的结论：光是由粒子组成的，并很快地达到了最高的综合：人们不能在物质和能量之间作出区分(见第十二章)。

卡诺在他的小册子中的著名论证旨在表明热的动力是温度的普遍函数。他的推理是立足于现在以他的名字命名的简单周期性过程(循环)。卡诺循环的基本点，是人们至少需要两个处于不同温度的热源来作功，而一旦给定温度，所能作的功有一个最大值。

卡诺所设计的过程在几乎所有的热力学书籍上都有描述。我们将对它作一个简略的概括。卡诺考虑一个气体，比如说空气，被封闭在一个装备有活塞的汽缸内，活塞可用以改变气体的体积，此外还有汽缸的热绝缘装置，和两个热库 A 和 B。这两个热库的温度标记为 T_A 和 T_B，设 T_A 高于 T_B。这样人们可让气体进行体积和压强中的绝热变化(没有热交换)和等温变化(温度恒常)。在图 2.2 中，压强 p 的变化表示为体积 V 的函数。对应于循环中特别重要阶段的体积，将用字母 V 加下标来表示，如 V_a，即用相应的体积的值来表示。由于我们注意的是非常确定的变化(图中由实线表示)，没必要标示相应的压强值。这种图在卡诺的论文中并没有出现，而是由克拉珀龙率先使用的。

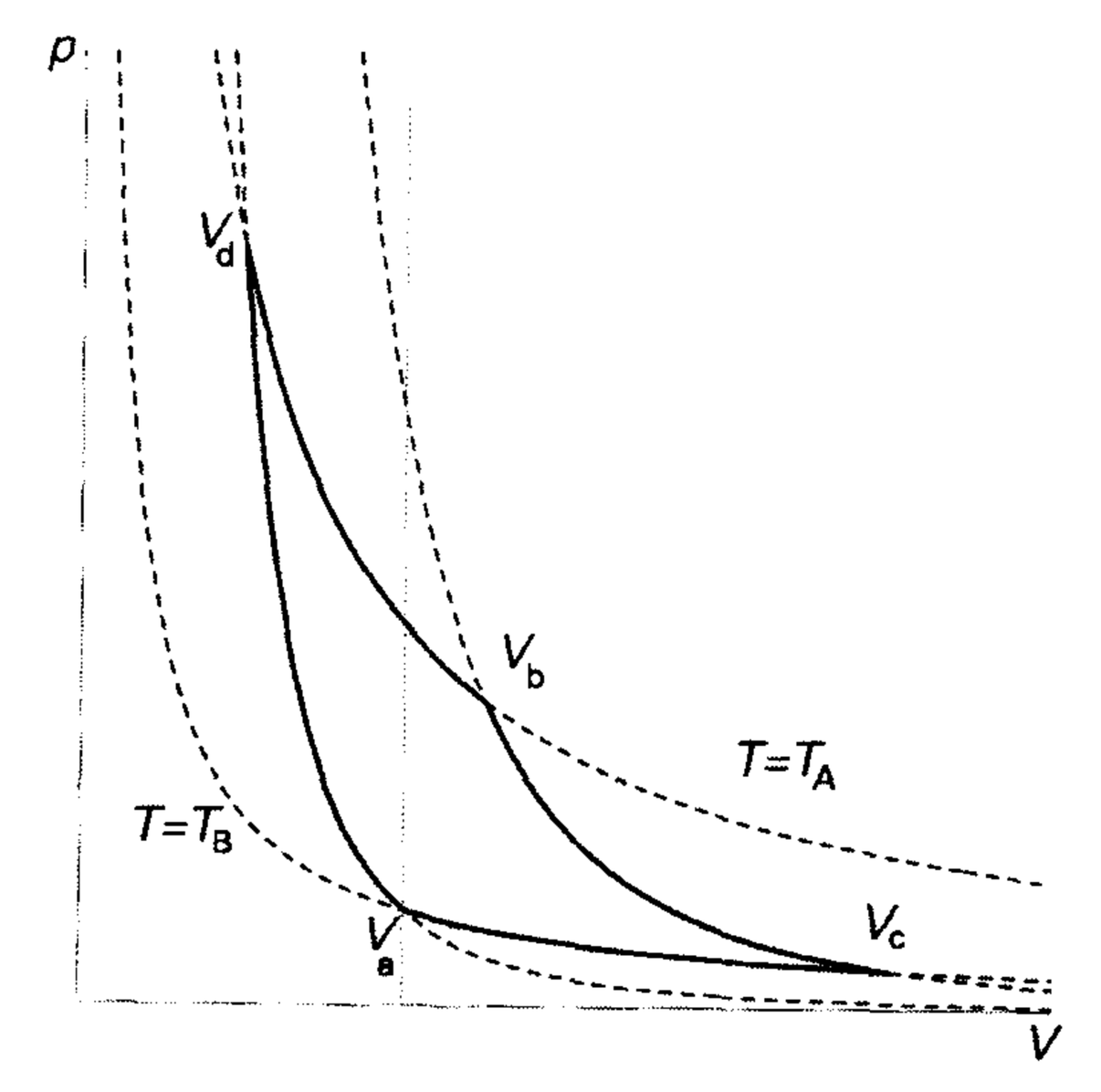


图 2.2　在压强—体积平面上的卡诺循环。

让气体首先与A接触。通过移动活塞，人们可以让气体绝热膨胀，由此它的体积会改变，比如说从 V_a 到 V_b。在图2.2中，变化的表示从直线 $V = V_a$ 与上部实线的交点开始。现在，气体是绝热的，并且被允许绝热膨胀，直至达到温度 T_B（当气体膨胀时，如果不供给它热量，气体就会冷却）。气体现在的体积是 V_c（请注意，虽然 V_b 是任意的，但 V_c 却为我们刚才所提到的数值所确定）。然后，我们通过一个温度为 T_B 的等温过程来压缩体积，直至体积再次成为 V_a（现在在较低的曲线上）。接着，是一个绝热压缩过程，直到温度再次变成 T_A（体积将取某一值，比如 V_d）。最后，我们让气体经过一个等温变化，使得再次回到体积 V_b（当然，通过起始状态）。这样，我们就闭合了这一循环，并能继续下去。

卡诺注意到，这一循环是可逆的，即它能按相反的秩序进行，并带有所有明显的改变（例如膨胀将会为压缩所取代）。于是，我们可以向前重复这一循环若干次，然后向后相同次，直到我们回到起始状态。这两个操作系列彼此抵消。因此，他说热质不可能产生比我们从第一系列操作中所获得的更大的动力量。于是，他得出结论：热的动力是仅由温度 T_A 和 T_B 决定的。这里明显有一个隐藏着的假设，卡诺在一个脚注中考虑到了它，即在变化之后，气体将含有与它在一开始时同样的热量。他接着说：

> 这一事实还从未被加以质疑。它首先被未加思索地承认了，然后在许多事例中被用量热计加以确认。要否认它，将会推翻整个用它作为基础的热理论。至于其他，我们可以附带说一句，热理论所依赖的主要原理需要作最为仔细的考察。许多实验事实在这个理论目前的状况中几乎仍然是含混的。（下划线为引者所加）

这一脚注或许与他的热肯定是一种能量、而不是物质的新思想相

联系，如上面所引的他死后发表的笔记中所表明的。

看了我们忠实地遵循卡诺的论证的描述后，人们不可避免地会问这一问题：为什么他不从组成这一循环的四个过程之一的起始处开始？ 为什么他不省略从 V_a 到 V_b，或者为什么他不从我们称为 V_d 的体积开始？ 如 M. 克莱因所强调的，人们不能脱离历史背景来回答这些问题。

克拉珀龙以一种简单的方式表示卡诺的工作，避免了这一原始论证看上去笨拙的方面。 他从体积 V_d 开始。 是克拉珀龙比卡诺聪明吗？根本不是。 事实上克拉珀龙的证明依赖于热质，而卡诺的则不用。

如果人们反对热质理论，那么人们就会遇到确定为克拉珀龙用作起始点的循环中那一点的问题。 这可以困难地用绝热定律求出，或像麦克斯韦在他的小书《热的理论》中所做的那样，通过省略从 V_a 到 V_b 的第一段变化得出。 这是确立卡诺循环最清楚和最优雅的程序。 而这是在卡诺的发现半个世纪之后，在热力学第一定律（见下面）已经被清楚地陈述之后，由有史以来最有天赋的物理学家之一设计的。 我们不可避免地要重复克莱因的话："对于卡诺的《反思》中看上去笨拙的和使人困惑的方面的分析，只会加强人们对于他的批判性洞察力的尊敬。"

卡诺循环的重要性，在于仿效它，一个装置就可构成一种从热中提取功，或是做功以降低温度（如在电冰箱中）的最简单的工具。 在理论思考与确定热机和电冰箱的效率（一旦两个温度 T_A 和 T_B 被确定后）中，对于它也有着极大的兴趣。

热力学这一学科诞生于对于卡诺的工作与焦耳所进行的实验结果的综合。 这一新兴学科的诞生，应归功于鲁道夫 · 克劳修斯（1822～1888）在德国的工作和威廉 · 汤姆孙（后来的拉格斯的开尔文勋爵，1824～1907）在大不列颠的工作。 这一学科（未提及物质的原子结构）由两条伟大的定律，即能量守恒（第一定律）和不可逆过程的存在（第二定律）中得出了若干推论。

第一定律始于这一事实：在任何物理系统中，都存在两种能量（为简单起见，我们忽略可能存在的电场和磁场），机械能和热能。它们的和可能因为对这一系统做功，或供给它热量而改变。像传统一样，做功与（或者）热量的符号可能是负的：在这种情形中，用通常的语言（与物理学中常用的数学语言相对的语言）来说，我们会说这个系统（对它物）做功与（或者）供热。同样，在某人的银行帐户上有一笔负数的钱，意味着他欠银行相应的正数的钱。简单地说，第一定律说的是总能量的变化等于对这系统所做的功，加上所供给它的热。

第二定律指出，并非所有与第一定律相容的过程实际上都能发生。虽然人们能轻易地做功以加热一个系统，但要通过供热来增加它的机械能，这却不总是充分的。它至少需要有两个温度不同的热源，如卡诺的论证中所表明的那样（有时一个热源可以自然地由环境来提供）。从根本上说，第二定律说的是热绝不会从低温物体传到高温物体上，而同时却不发生某种相关的变化（也可见下章）。

由于汤普森的生动而优雅的表述，这些新的思想得以迅速传播开来。原子模型中的能量守恒，由赫尔曼·冯·亥姆霍茨（1821～1891）而得到最终的论述，亥姆霍茨与迈耶一样，也起始于生理学研究，关于他我们在上一章已有详细的介绍。在他1847年的重要著作里，他清楚地引入了势能的概念。他的伟大的前辈有伽利略、惠更斯、莱布尼茨和D.伯努利。新出现的热力学的观念很自然地拓展到了连续介质领域，连续介质力学前此已经发展起来，尤其是经过伦哈德·欧拉和奥古斯丁·路易斯·柯西的工作。热力学概念的加入，导致了一门今天经常被称之为连续介质热力学的学科的诞生。

热力学可以看作是我们对于物体中最微小粒子的力学的作用的限制，但它还不足以完成我们对于自然的描述。物理学中正发生着更为重大的变化，而这逃脱不了亥姆霍茨的关注。在一个面向广泛听众的演讲中，他评论说：力学的成功已使得科学家们如此的惊奇和陶

醉，以至于认为力学能用于解决所有问题。这种幼稚的自信心不仅导致了解释新现象的素朴的努力，而且也导致了奇异的旨在模仿人的能力的机械装置的制造(确实，有的机械人造得如此之好，以至于制造者被怀疑有巫术而被关进了监狱)。这些能工巧匠们为自己制定了认真而非无效的目标，尽管大胆，却不乏洞见。他们的创造物在今天或许会被看作是复杂的玩具，或是历史古玩，既丰富了力学，也揭示出它的局限性。因此，亥姆霍茨说，我们不应试图去制造能从事上千种人的典型动作的机器，而需要的是一种机器能从事单一的行为，以取代上千个人。热力学的研究确实大大丰富了可用的工具，但我们还需要另一种理论，这就是电磁学。

电学和磁学

在查理士-奥古斯丁·德·库仑(1736～1806)以最严格的牛顿传统所进行的实验之后，电磁现象知识的极大推广有赖于路易吉·伽伐尼(1737～1798)、亚历山德罗·伏打(1745～1827)、汉斯·克里斯蒂安·奥斯特(1777～1851)、安德烈·玛丽·安培(1775～1836)和其他许多人，其中应当特别提到的是乔治·西蒙·欧姆(1787～1854)，他提出了联系电流与导线两端之间电势差的定律。实验图景的最后标记来自迈克尔·法拉第(1791～1867)的根本性的贡献。有必要引用玻尔兹曼关于法拉第工作的评价："后者，运用相当有限的手段，发现了如此丰富的新的事实，以至于未来的人在长时期中只能把自己限定于说明和实际应用所有这些新的发现。"

我们还可以补充的是，在这些日子里，玻根多夫的《物理学年鉴》常常发表用其他文字写作的最重要的论文的德文译文，而法拉第是最受关注的作者。他的文章加起来有近三大卷，比其他任何一位外国物理学家的两倍还要多。

法拉第生于靠近伦敦的地方，父亲是位铁匠。他的家庭很穷，

付不起他的学费，因此他 13 岁就到书店找了份跑腿送书报的工作，一年后成为装订书籍的学徒。法拉第读了许多正在装订的书，对科学有着强烈的兴趣。他开始自己动手做实验，并且或许在不知晓威廉·尼科尔森(1753～1815)和卡莱尔(1768～1840)十年前已做过水的电解实验的情况下，重新发现了电解并建立了它的基本定律。其后，在 22 岁那年，他开始寻找工作。于是在 1812 年底，著名的化学家汉弗莱·戴维爵士(1778～1829，法拉第在学徒期间听过他的课)收到了一封信，写信者在信中表示希望能在戴维的科学实验室里找一份工作。随信附上的有这位年轻人出席戴维的公共演讲时所做的工工整整的笔记，这份笔记至今仍保存在伦敦的皇家研究所。在戴维的推荐下，经过面试，法拉第于次年春天在皇家研究所的实验室得到了一份工作，并毕生在此从事他的科学研究，先是做研究助手，在戴维去世后担任实验室主任，从 1833 年起，担任为他设立的化学教授的职位。有趣的是，人们注意到皇家研究所正是由我们前面已遇到过的康特·伦福德主办的。

人们早就有了把特殊的电和磁的流体设想为电磁现象原因的想法。安培成功地提出了用分子电流加以说明，从而使磁流体的假设不再需要。威廉·韦伯(1804～1891)为完善电流体理论，提出所有那时已知的电磁现象都能以一种简单的方式加以说明。为此，他想象电流体由微小粒子组成，正如有重物体和传光的以太一样，而电粒子之间的力则类似于其他物质之间的力，惟一的一个重要修正是两个粒子之间的力还进一步地依赖于它们之间的相对速度和加速度。

1831 年，哥廷根大学物理学教授的职位有了空缺。当时哥廷根最有影响的科学家是卡尔·弗里德利希·高斯(1777～1855，“数学王子”)，他的意见自然为人们所关注。他提出了五位物理学家并作了排序，然后列出了三人供学校向汉诺威(公国)政府推荐。其中一位，是时年 27 岁的韦伯，但高斯显然表明了他倾向于 C. L. 格尔林，一位优秀的实验家和讲师，这种倾向当然会被作为教师和政府的中介

的大学校方所注意到。校方把高斯用于称赞格尔林的溢美之词转到了韦伯名下，结果韦伯得到了这项任命。有时，官僚们并非如科学家们所描绘的那么坏，至少，在1831年的汉诺威是这样。

时隔不久，韦伯与他的伟大的同事成了好朋友，开始合作研究地球的磁场。韦伯所获得的实验结果超出了高斯的预期。其后，韦伯卷入了政治上的麻烦。事实上，在1837年，自汉诺威王朝进入英国王室以来的汉诺威与英帝国的联盟，由于萨利克法案而告解体。若按这一法律，妇女不能就任这一法律所成立的国家的王位。因此，当维多利亚公主成为英国女王(这个起源于法国的法律当然不适用于英国)，他的叔父恩斯特-奥古斯丁继任了汉诺威的王位。他废除了为汉诺威人民一度享受的自由宪法，并要求公职人员，包括哥廷根大学的教授，要宣誓效忠于他个人。有七名教授，其中包括韦伯和德语学者雅各布、威廉·格林(因他们编选的民间故事而出名)拒绝这么做。他们的理由是：他们已经对王国的宪法宣誓，不能再使它蒙羞。令高斯非常悲伤的是，韦伯被剥夺了教授职位。他的免职不伴以流放，像他的另六位同事中的一些那样。最终，他于1843年接受了莱比锡大学的教授职位，在那儿一直干到1849年，他在电学上的主要理论研究都是在此阶段中做出的。1848年，汉诺威的政治气氛改变了。韦伯同意回到哥廷根，而事实上他回来时，已是1849年的春天。

在前一节和本节前面部分描述的工作之前，物理学家在有形物质之外，还假设了热质、传光物质即以太、两种电流体、两种磁流体等等的存在。在我们的描述所达到的阶段，只考虑有重物质、传光以太和两种电流体就足够了。人们认为这其中的每一种物质都由原子组成，而物理学家的任务，就在于确定任意两种原子在一定距离下的力的作用的规律，然后解出在一定起始条件下由这些相互作用引出的方程。

显然(至少在事后)，这种在解释奥斯特和法拉第实验时，无论如

何也要遵循牛顿纲领的努力，是非常不自然的，也是注定不能长久的。新的途径已经为法拉第所开辟，而他本人承认，由于他缺乏数学教育，他无法评价拉普拉斯和西米恩·丹尼斯·泊松(1781～1840)的势理论。然而，用詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(1831～1879)的话来说："在他理智的目光中，能看见穿越所有空间的力线，而那些数学家在这儿看见的却是超距吸引的力的中心。法拉第看见了媒介的地方，他们除了距离之外，一无所见。法拉第看见了正在媒介中进行的真实作用中的现象的所在地方，而他们则满足于在超距施加于电流体的作用范围内发现了它。"

例如，让我们来考虑最简单的新电动力学现象：一个电路作用在一个处于同一平面上的磁极上，这一作用由一个垂直于这个平面的力而得以显示出来，正如由著名的奥斯特实验的解释可立即推出的。按照机械论的观点，这个力不那么容易说得清楚，它应当把这个力看作是作用在电路元素与磁极之间的基本力的产物。由牛顿理论可知，这样的力(普遍的吸引、库仑的静电力和静磁力、博斯科维奇和拉普拉斯的分子间的力)是沿着两个相互作用的元素之间的连线方向的，满足作用与反作用原理。但牛顿模型的深入人心已到了如此地步，以至于即使是像拉普拉斯、安培和韦伯这样的人物，也试图去找出上述类型的基本定律，而毫不顾及它所意味着的困难。这些找出的基本定律彼此各不相同，当被用于指称整个电路，而不是它的元素时，得出了与实验相一致的结果。

第一个对我们刚说明的科学系统的攻击，是指向它最薄弱的方面，韦伯的电动力学的。用玻尔兹曼的话来说，这一理论

可以说是这位有天赋的探索者的智力工作的花朵，通过他的记录在电动力学和其他地方的许多思想和实验成果，他已获得了以其电学研究为代表的不朽的名声。然而，对于其所有的新颖精巧和数学上的微妙而言，它带有过多人为性的印记，以至于不

会有几个热心的追随者会无条件地相信它的正确性。

与这种理论相对立，麦克斯韦发展起了他自己的理论。在坦承韦伯所取得的成就的同时，他开始把法拉第的观念发展成为一种数学形式。

麦克斯韦是克科卡德布莱特郡的一位土地所有者的儿子，与法拉第不同，他对数学运用自如。14 岁那年，他以一篇如何用大头针和线作一个标准的椭圆的论文而获得了爱丁堡科学院的数学奖。几年之后，他向皇家学会提交了两篇论文，一篇是《旋轮线理论》，另一篇是《论弹性体的平衡》。两篇论文都是由别人代为在皇家学会成员面前宣读的，据伽莫夫说，这是因为“不宜让一个穿着夹克衫的小孩登上这里的讲坛”。在结束了在爱丁堡的学业之后，麦克斯韦成为剑桥三一学院的学生，他于 1855 年 24 岁时，成为这所学院的研究员。1855～1856 年间，距他被选为学院研究员不久，他在剑桥哲学学会面前宣读了一篇论文，第一次试图形成电场的一个力学概念。1856 年，他被聘为阿伯丁的玛丽撒尔学院的自然哲学教授，在这儿一直工作到 1860 年被任命为伦敦国王学院的教授。但是在 1865 年，他的隐居起来从事研究的期望，以及他对这所学院里繁文缛节的不自在，使他回到格伦莱尔的乡村庄园，并在这儿写出他著名的《电磁理论》。1874 年，他被请回剑桥，担任新创立的卡文迪许实验室的首任主任。他于 1879 年(同年爱因斯坦出生)短暂而痛苦的疾病后(几乎可以肯定是癌症)死于剑桥，死时年方 49 岁。

在第一次尝试用数学描述法拉第的观念之后，麦克斯韦稍许修改了他的电动力学概念，在他的一个方程中引入了一个附加的术语，即所谓的位移电流。麦克斯韦的论文有着两个方面的创新：其一是他告诫，对于各种关于自然的观点，不能仅仅因为某一种的一系列推论为经验所确认就认为它是惟一正确的；其二，是他导引了一种关于电磁现象的全新的理论。

关于第一点，麦克斯韦用许多例子表明，一组现象经常能以两种全然不同的方式说明。这两种说明方式同样好地表征着全部事实。只有加上新的，因而是未知的现象，其中的一种对于另一种方法的优越性才能表现出来；而当着新的事实被进一步发现，前一种方法又会为第三种所取代。有鉴于牛顿本人也没有像他的追随者那样，宣称通过一种把他们带回牛顿的说明，他们已认识到了事物的本性，麦克斯韦明确地声明：他自己的理论仅仅应被看作是自然的一幅图像，一种力学类比，它在当时允许人们以一种最为综合的方式，来概括所有现象。麦克斯韦的这一观点在物理学以后的发展中极有影响，因为紧随着他的理论观念而来的，正是实验上的成功。

关于第二点，麦克斯韦提出，把任何带电或磁的物体想象为仅作用于一种填满整个空间的媒介(即以太，我们今天会称之为场)的与其相邻的粒子上；这些以太粒子然后又作用于媒介中与它们相邻的粒子，直到把作用传播到下一个物体上。这种人们在连续介质理论中已知的接触作用(而不是超距作用的力)，除了其他的意义之外，允许我们重建基本力的最具特色的性质——满足作用与反作用定律。

两种理论能同样好地说明到那时为止的已知现象，但麦克斯韦理论胜过了旧的理论。按照麦克斯韦的理论，一旦有可能产生出足够快速的带电运动，就会在媒介中产生出完全服从光波定律的波动来。由此，麦克斯韦推测在光物体的粒子中，有着不变的快速电运动，由此而在媒介中激发起的振动，正是光。传递电磁效应的媒质因而等同于前已要求的光以太。这样，人们可以仍像从前那样称呼它，尽管它必然还有着许多其他性质，以服务于支撑电磁作用。德国物理学家海因里希·赫兹(1857～1894)于1888年用实验证明了不同于光的电磁波的存在，从而在古利叶莫·马可尼(1874～1937)的先驱性的实验之后，引导了无线电通讯技术的发展，而这表征了朝向我们今天所观察到的所谓第三次工业革命发展的重要分支的第一步。

我们应当提到的是，麦克斯韦并非是注意到电和磁的动力学理论

与光的波动理论之间可能具有联系的第一人。事实上，出现在麦克斯韦方程中，并证明为等同于真空中光速的那个常数，在韦伯和卡尔·纽曼的工作中已经出现，但他们趋向于强调这一类似的表面性，不过是基于数字上的巧合(当时可获得的数据也不准确)。惟一在麦克斯韦之前就提出这种情形并非巧合的科学家是伯恩哈德·里曼(1826～1866，以其关于复变函数，尤其是弯曲空间的工作而闻名，后者铺平了爱因斯坦广义相对论的道路)。他明确地指出，电作用以光速传播，并写出了电势的波动方程。尽管解释里曼的观点并非易事(他从《物理学年鉴》撤回了这篇论文，直到他身后才发表)，他的确有着一种关于场论的极好的观点，比麦克斯韦的更具现代性。事实上，麦克斯韦对于里曼的评论(说他避开了谈论波动赖以传播的媒质)在我们看来并非是一种批评，因为以太并不存在的观点在20世纪已经普遍流行。

如我们在下章将看到的，麦克斯韦在气体运动论中，也是最具原创性的科学家，正是他，开辟了玻尔兹曼伟大发现的道路，而那是我们在下面几章中所要探讨的。

当玻尔兹曼开始其大学学习时，学校课程中所主要强调的，仍然是法国学派的数学方法，它赋予牛顿物理学以优美的形式。然而，如玻尔兹曼在关于基尔霍夫的讣闻中所说："那时理论物理学正尽力从天上降到地面"。法国学派的数学与麦克斯韦的新的、部分经验的进路，点燃了玻尔兹曼灵感的火花，他总是把连续模型解释为原子论实在的理想化表述："拉普拉斯、泊松、柯西和其他人之所以由原子论考虑出发，显然是因为在那些日子里，科学家清楚地意识到，微分方程不过是原子观念的符号，因此他们需要使后者简单化。"

因此，玻尔兹曼总是把宏观连续体的性质看作是原子模型研究的结果。与此对立的或许是欧拉的观点，他喜欢从它们的宏观(理想化)性质来定义连续介质(他简单地称之为材料，因为他不用原子模型)。他的典型的表述为："理想的材料必须被定义。它们的性质也

因而必须被探索。它们对于特殊物理材料的可应用性界限，通过将理论的详尽预言与测量结果的比较，随后也将被确定。”这种无视原子观念，而倾向于连续体的观念在19世纪马赫的影响下获得了其基础，并导致了“唯能论”（见第十一章）。对于这两种观点（从看作连续体的宏观材料出发，和从构造为原子结构的界限的同一物体出发）的表述，时至今日依然与我们相伴。

第三章

玻尔兹曼之前的分子运动论

早期分子运动论

早在1738年，丹尼尔·伯努利就提出了气体是由以很高的速度四处冲突，并按照基本力学规律碰撞和反弹的弹性分子所组成的想法。当然，这并不完全是一种新的想法，因为有几位希腊哲学家早就断言过，所有物体都由运动粒子组成，即使这些物体自身看起来是静止的。我们已经看到，牛顿和博斯科维奇也有相同的观点。

第一个原子论的荣誉，实际上应归功于阿布德拉的德谟克里特，他生活于公元前五世纪。这里，我们可以重复麦克斯韦在一次通俗演讲中的话，只需对其中关于世纪的数字稍作修改：

我们对23个世纪之前色雷斯的科学组织，或是当时用来扩

展物理研究兴趣的方法知之不多。然而，在那个时代，确有着一批献身于追求知识的人，其热情配得上英国皇家学会最杰出的成员。而德谟克里特向阿布德拉的听众们说明他的原子论的那些演讲，不仅就其绝好的见解而言，而且在其杰出的天才上，都被认为即使是美国也无法企及（译注：这里为一转喻："见解"与"天才"两词前面的形容词英文原文都是"golden"，而美国加州别名为"the Golden State"，即"产金之州"）。

主张原子论的还有其他哲学家，比如留基伯（公元前五世纪），这一思想通过伊壁鸠鲁（公元前341～前270年）而传到了罗马。古代对于这一观点的最为完全的说明，是卢克莱修（公元前99～前55年）著名的诗作《物性论》。起初，原子论学说被认为是把一个数量想象为由一个整数（用某些基本单位）给出这种古老方式的遗存，即那种导致了芝诺悖论（其中尤以阿基里斯和乌龟的例子为著名）的概念。这些悖论产生于把空间看作是连续的，而时间仍然由有限数量的瞬间所组成，直到亚里士多德提出时间像空间一样，也是无限可分的。当时，很容易试图应用类似的论证于物质，认为那种主张物质是连续的概念比原子论更为科学。

这里，有必要回顾一下卢克莱修的论证。他认为原子并没有填满空间，因为在原子之间有真空。如果情形确实如此，就有可能没有运动：

> 因此，必定有一种虚空，
> 空无一物且没有接触。
> 倘若无此虚空，物体根本就无从运动；
> 因为此时物体抵抗和堵塞的本性，
> 将属于所有的一切；
> 于是无物可以行进，因为无物可能产生。
>
> （《物性论》第一部，334）

连续学派起始于阿那克萨哥拉，他主张物体的单元部分(无限小的原始元素)类似于整体，不存在真空，所有的运动都像鱼在水中的运动一样：

> 他们主张流体产生于运动着的鱼，并开辟了他们液体的道路，
> 由此鱼儿在身后留下空间，
> 产生的波浪得以在此流动。
>
> (《论自然》，第一部分，372)

伊壁鸠鲁提出的原子论在某些方面依然有冲击力，但除了它只不过是定性的而不是定量的这一事实外，它还包含了一些基本的缺陷。最显著的缺陷看来是出自对力学的第一原理，即惯性定律的无知。因此，原子在真空中的永恒运动被认为是由于它们的重量。这一假设与地球是平坦的这一观念相关，因而也与朝下的方向是绝对的这一信念相关。此外，按照卢克莱修的看法，原子的速度要大于光的速度，他论证说，这是因为光的原子运动在空气中，而物质的原子运动在真空中。最后，卢克莱修引进了偏斜，这在希腊哲学家的著作中并无证据，它是随机和偶然地对垂直方向的偏离。这一奇异的假设有着两重目的：一是让原子相交，从而形成物质客体，而不只是保持下落；其二是给动物和人类的自由意志留出空间。

在中世纪，一些阿拉伯的思想家接受了原子论，而反过来，它却为西方的经院神学家们所激烈攻击，他们认为它与宗教学说教义相冲突。在文艺复兴时期，与原子论相关的思想出现在乔达诺·布鲁诺(1548～1600)、伽利略·伽利莱(1564～1642)和弗朗西斯·培根(1561～1626)等人的著作中。在此之后，法国哲学家彼得勒斯·伽桑狄(1592～1655)把物质的原子构造当作是他的哲学的基本点。以后，笛卡尔提出空间的基本性质就是为物质所占据，并否认原子的存在。相反，莱布尼茨则把他的单子看作是万物的最终元素。

因此，从一开始，近代科学就面对着两种相对立的实在观，一种把实在看作是连续的，另一种则认为实在由分立的粒子组成。有时，两种描述可应用于同样的结果。连续性理论运用较少的连续量，例如密度、整体速度、气体的压强等，它们在时间中的演化基本上为不可逆的定律所支配，这意味着耗散和熵的增加(见下面)。这些定律一般对于时间变量而言是不对称的，“时间箭头”从过去指向未来，即与熵增的方向一致。另一方面，原子理论设想物质为不连续的，由极大数目的粒子所组成，按照时间对称的力学规律运动。

如我们刚才所说，由于这两种描述经常产生同样的结果，我们必须从大数量的粒子运动，来说明出现在宏观日常生活层次上、为连续变量所描述的规则的物理过程；还要说明这样一种事实，即一种连续的描述，总伴随着一种时间对称性的破缺，而且是从可逆的微观运动向不可逆的宏观现象过渡。而这一问题，正是玻尔兹曼科学研究的主题，我们将在本章和随后各章中反复讨论到它。

在前一章中，我们提到了博斯科维奇的理论，这可以看作是纯粹的单子论的一个典型。他的理论主要是定性的。而如上面提到的，丹尼尔·伯努利(1700～1782)首先在我们今天所理解的意义上，提出了物质的原子结构的思想。他说明了压强的起源，并由此产生了气体的分子运动论。这一新思想在于，当这些运动分子撞击在一固体上时，它们碰撞所产生的力学效应就构成了通常所谓的气体压强。事实上，如果我们仅依据原子假说，我们会假设压强由分子的斥力所产生。

丹尼尔·伯努利属于一个数学家和数学物理学家的大家族(他们的名字有时拼作伯努伊利)。他们出身于一个新教徒家庭，因躲避天主教对胡格诺派教徒的大屠杀而于1583年从安特卫普逃亡。他们先逃到法兰克福，然后又到了巴塞尔，并成为富裕的商人。其中之一，即老尼古拉，是这个数学家家族的奠基人。他们的人数是如此众多，以至于彼此间的第一个名字(即自己的名字)都无法区分。事

实上，他们中有三位名字叫尼古拉，三位叫伯努利·约翰(或让)，两位丹尼尔，两位雅各布(或雅克)。在数学史家中，关于这个家系树上各位成员的地位，尤其是涉及到三位尼古拉时，也有一些混淆。我们在这里只说到雅各布第一(家族中的第一个数学家，1654～1705)、约翰第一(1667～1748)和丹尼尔第一(1700～1782)。由于他们都是家族中第一个使用这些具有代表性的名字的人，我们在下面将简单地只提他们的名字。

老尼古拉本希望他的长子能成为一名牧师，但一种不可抵御的召唤，使雅各布转向了科学研究。实际上，他是一位自修者，曾到处旅行，先是穿越了瑞士和法国，以后又穿越了英格兰和荷兰。1687年，他得到了巴塞尔大学的教授职位，他的教学吸引了许多学生。他是莱布尼茨的崇拜者和朋友，并被选为巴黎和柏林的科学院成员。他是变分法的创始人，并对分析几何和概率论作出了重要贡献。他看来也是第一位使用“积分学”这一术语的人，尽管他的弟弟和学生约翰后来声明这一优先权。

老尼古拉的第十个孩子，事实上既是一位有着同等声望的伟大的数学家，也是一位麻烦不断的人。他生性多疑，妒忌成性，与他的兄长兼老师雅各布、他的儿子丹尼尔都曾发生过争吵。他的父亲原希望他成为一名商人，但这位父亲的希望再次落空了。约翰先是成了一位医生，然后在雅各布的指导下献身于数学。他起初在格罗宁根大学任教授(他的儿子丹尼尔出生于此)，以后接任他哥哥在巴塞尔大学的教授职位。约翰是一位著名的数学家，对于微积分在欧洲的传播作出了重要的贡献。与他同城的居民们对他满怀崇敬，尽管他们对下面的诗句中的第二行确实不无保留，这些诗句是沃尔塔瑞为约翰的文集所作的卷首语：

他的理智领悟了真理，
他的心灵充满了正义，

他是瑞士的荣耀，
同样也是人类的荣耀。

尽管有着这些保留，约翰的墓碑上还是刻上了这样的词句：

这块石头下面，
长眠着巴塞尔从未有过的巨人，
他那个世纪的阿基米德；
在数学上与欧洲的第一流巨星
笛卡尔、牛顿、莱布尼茨
并驾齐驱的：
约翰·伯努利

约翰与他的儿子丹尼尔之间，出现了他与自己的父亲之间出现过的同样的问题。他希望丹尼尔成为一位商人，但年轻人先是成为一位医生，然后又成为一位数学家。这种反叛成为父子间不久表现出来的难以平息的不和的首要原因。这种不和当1734年巴黎科学院在他们之间分配一场竞赛的奖金(丹尼尔曾10次赢得这种奖金)时，变成了公开的冲突。约翰不耻于盗用他儿子发表于《流体动力学》一文中的部分成果，这就更激发了彼此之间的火气。

在许多伯努利之中，丹尼尔在将数学应用于物理学问题上，可称得上是最有造诣的。事实上，他与欧拉分享了创立数学物理学的荣誉。他在年仅25岁时，就被任命为圣彼得堡大学的数学教授，但他发现从文明的角度看，这地方缺乏的东西太多。于是，他回到了巴塞尔，在那儿先后当过解剖学家、植物学家和物理学家。他对概率论及其对诸如婚姻和天花接种等不同主题的应用，对微分方程，对流体动力学(及用他的名字命名的著名定理)等都作出了重要贡献。一个他为之骄傲的趣闻是：当他年轻时，在一次旅途中，他与一位外国人

有过一次有趣的交谈，但当他有礼貌地自我介绍说“我是丹尼尔·伯努利”时，那位外国人对此的回答是：“那我就是伊萨克·牛顿！”

尽管丹尼尔·伯努利的方案能够说明气体中的基本过程(可压缩性，膨胀的趋向，在压缩中温度的上升和膨胀时的下降，趋于一致和空间均匀)，但直到进行定量研究前，关于它没有确定的见解。气体分子运动论的实际发展相应地也发生得较晚，直到19世纪。

为简单起见，当我们并不论及其他时，本书的气体分子可以被设想为完全均匀的、刚性的和弹性的球体，服从经典力学的定律。因此，如果没有像地球引力这样的外力作用在这些分子上，它们中的每一个都将按直线运动，除非它偶尔撞到了另一个球体，或是固体的墙上。出于明显的原因，这类球体通常被称为弹子球。我们也假设球体是完全光滑的(没有摩擦的)，以便任何围绕通过它们中心的轴的旋转运动都能被完全忽略(因为它是不可改变的)。中心的速度被称作分子的速度，无须任何进一步的限定。只有在第八章中，当我们讨论多原子分子时，我们才会明显离开这种分子模型。

尽管产生这些系统动力学的规则很容易确定，但相关的现象却不那么简单。它们事实上很难理解，特别是当人们感兴趣的是系统在较长时间周期中的倾向(所谓的各态历经过程)，或是当球体的数目非常大时的情形(分子运动论或动力学的限度)。当处理气体时，硬球动力学的这两个方面都是相关的，但我们通常更感兴趣的是当粒子的数目非常大时，这个系统行为的概况。这是因为当在大气压下和温度为摄氏零度时，一立方厘米气体中的空气中有着 2.7×10^{19} 个分子。

考虑到如此大量的粒子数，通过说明每个球体的微观态，即其位置和速度来描述气体状态的尝试当然是没有希望的，我们只能依赖于统计。这一类的描述是可能的，因为实际上所有我们可探测的典型观察，都是气体宏观态的变化，由像密度、整体速度(例如风速)、温度、压强、粘滞应力，以及热流这样的量所描述，这些量可以被看作是描述微观态的量的适当的平均。他曾计算过一个静止且温度均匀

的容器中的空气压强，这是伯努利工作中含有上述基本思想的一个小小例子。这一计算是分子运动论中所能进行的计算的范例。

然而，这里必须考虑一个根本的问题。如果我们知道某一瞬间每一气体分子的精确位置和速度，按照力学定律，系统未来的变化就应是完全确定的。即使如所允许的，我们假设在某一时刻，分子的位置和速度满足某些统计规律，我们也全然无权预期在任何以后的时刻气体将遵从同样的统计假设。这一方程表现了当气体处于平衡态时，速度的三个垂直分量平方的平均值之间的相等。尽管这在统计上看起来是明显的，我们必须证明这也是力学所预言的。在刚刚提到的例子中，证明力学确实提供了所需要的证明。然而，如果我们再向前一步，问我们如何能保证前述的统计假设具有实际意义，即事实上一容器中处于平衡中的气体满足于它时，事情就不那么容易了。而如果气体并未处于平衡，如气体围绕着以一定速度运动的车辆的情形时，问题显然就要复杂得多了。

自从气体分子运动论问世以来，这类问题就不断提出。时至今日，这一问题已得到很好的理解，一种严密的气体运动论正在形成。这些发展的重要性在于这么一种需要，即不仅要为这么一种基本的物理理论提供一个坚实的基础，而且要作为对宏观尺度非平衡现象理论极为重要的数学构造展示一个范例。我们将在第五章重提这个话题。

现在，回到气体运动论的史前史，我们注意到伯努利的理论问世后不久，就为日内瓦的乔治-路易斯·勒萨热(1724～1803)所独立地提出了，然而，他却把主要精力用在了说明引力是由于原子的碰撞引起的。其后，约翰·赫勒帕斯(1790～1869)在他发表于1847年的《数学物理学》一书中，广泛地应用了这一理论。他出生于布里斯托尔，是一位麦芽制售者的儿子，但尽管他缺乏早期教育，却设法自学了数学和法文。在显然对伯努利的工作一无所知的情形下，他继续前进，并首先表述了绝对温度依赖于分子速度的想法，尽管他运用了一个很不寻常的温度概念(实质上是我们的绝对温度的平方)。在

这儿，我们不想详述他的理论的不精确性，或是他关于空气分子对于机车运动的影响的观点。同样，是他首先给予气体中分子的平均速度以明确的价值。通常被归之于这一优先权的詹姆斯·普雷斯科特·焦耳(1818～1889)，看来是在赫勒帕斯的基础上进行他的计算的。无论如何，他们的结果是惊人的：氢中的分子平均速度证实为约每秒两公里，大于任何当时火炮实战中所能达到的速度。

另一位重新发现了基本的气体分子运动论，但又不被他的同时代人所承认的英国科学家是约翰·詹姆斯·沃特斯顿(1811～1883)。甚至在不列颠，也没有什么人注意到他的工作。麦克斯韦的文章中极少提到他的论文。兰金倒是在1864年和1869年两次引用过他的研究。

他的工作迟迟未引起重视，直到1891年才为瑞利爵士重新发现。

因此，首次发现近代分子运动论的荣耀，就转到了德国。然而，经常被引用的，是一篇由奥古斯特·卡尔·克朗尼格(1822～1879)撰写的并不特别令人激动的文章，这或许是由于为了把鲁道夫·克劳修斯(1822～1888)的注意力吸引到这个主题上来，它起到了重要的作用。当克朗尼格的论文发表时，克劳修斯刚刚来到苏黎世工业大学，但可能在此之前，他就此主题已有过一些没有发表的工作。他把分子运动论发展到了一个成熟的阶段，清醒地认识到热能不过是分子随机热运动的动能，并以运动学语言来说明热力学第一定律。

如我们所知，克劳修斯是表述热力学第二定律的第一人，并且是隐含着的熵概念的发现者。他的关于气体分子运动论的第一篇论文题为“论我们称之为热的运动”，于1857年发表于玻根多夫的《物理学年鉴》上，确定了19世纪分子运动论的研究范围。他早期关于大气物理和热力学的研究经历促使他去回答人们对于分子以高速运动这一理念的朴素的反对，并由此确立了这一新理论的纲领和若干概念。首先对克劳修斯的第一篇论文作出反应的科学家中，有一位意大利化学家斯坦尼斯劳·坎尼札罗(1826～1910)，他复活了建立在阿梅迪奥·阿伏伽德罗(1776～1856)的假说基础上的近代形式的化学原子论。他

的名著《化学哲学概略》(首发于 1858 年，1961 年由爱丁堡的阿莱姆比克俱乐部重印)于 1860 年卡尔斯鲁厄会议上分发，其中引述了这一最新研究(“从盖-吕萨克到克劳修斯”)以支持阿伏伽德罗的观点。

克劳修斯还于 1858 年引入了平均自由程的概念。平均自由程为一个分子，即一个其直径我们表征为 σ 的硬球在两次碰撞之间的平均距离。我们来考虑一个撞击任意其他分子的运动分子，假设被撞分子是静止的(这样没有什么本质不同，但简化了问题)。当运动球到达距静止球的中心距离为 σ 处时，碰撞就发生了。这样，为了计算两次碰撞之间路程的长度，我们可以把运动球 S 当作是一个点，而静止球则有着双倍的半径 σ(见图 3.1)。于是，如果 S 在两次碰撞之间运动的平均距离为 l，这就意味着在底为 $\pi\sigma^2$ 高为 l 的圆柱体中只有一个分子，即 S，或 $n\pi\sigma^2 l \cong 1$，其中 $n = N/V$ 是单位体积中的分子数。因此 $l \cong 1/(\pi\sigma^2)$。

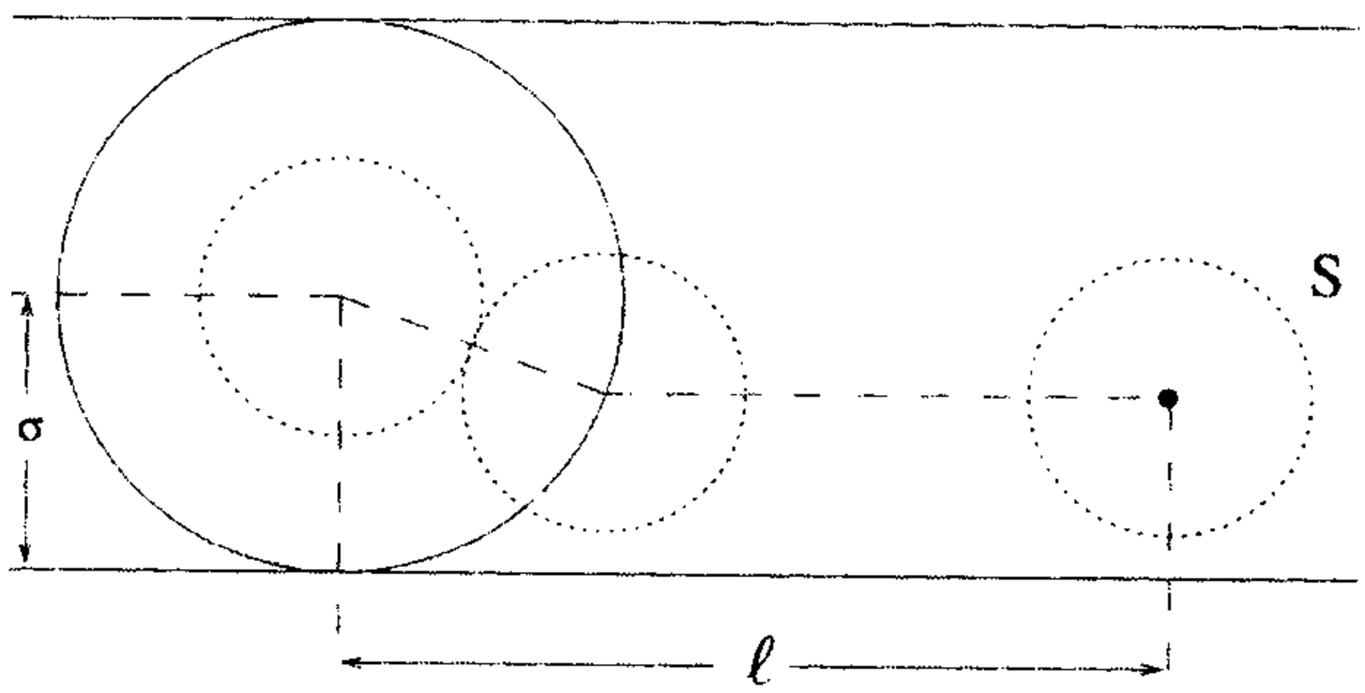


图 3.1 一个分子在两次碰撞之间的自由程。运动分子 S 由一个点表示，其他分子由有着两倍半径(在接触点处中心之间的距离)的球表示。虚线圆表示实际的球。

为使这点更加形象化，我们可以考虑一个人在森林里，以一确定的方向和确定的高度开枪射击的问题，假设森林里所有的树木的直径都相同。现在考虑子弹在森林里的自由程 l。为便于进行统计计算，我们设想许多人占据着稍许不同的位置，每人以相同的方向，比如说从北向南(见图 3.2)射出子弹。为避免由于子弹在能接近有些

树之前，就击中其他树木，因而这些树木不能被击中的问题，我们应考虑一种理想化的森林，使得如果我们把它再划分为许多平行的从北到南、与树的共同直径同宽的细条，那么在每根细条上便严格地只有一棵树。 树在确定的细条上的位置是随机选择的。 如果我们在一张纸上画出树的截面，我们在对应于子弹路程的那部分细条上涂上灰色。 如果有 N 棵树，我们就有 N 条细条，如果忽略树的截面所占的很小区域，灰色部分趋于覆盖整个树林的一半(见图 3.2)。 这是由于树的位置是随机的：有些路径长些，有些短于从北到南的一半，但其统计平均是长度的一半。 于是森林的面积近似为 $A = 2Nl\sigma$，其中 l 为子弹的平均路径，因此 $l = (1/2)A/(N\sigma)$。

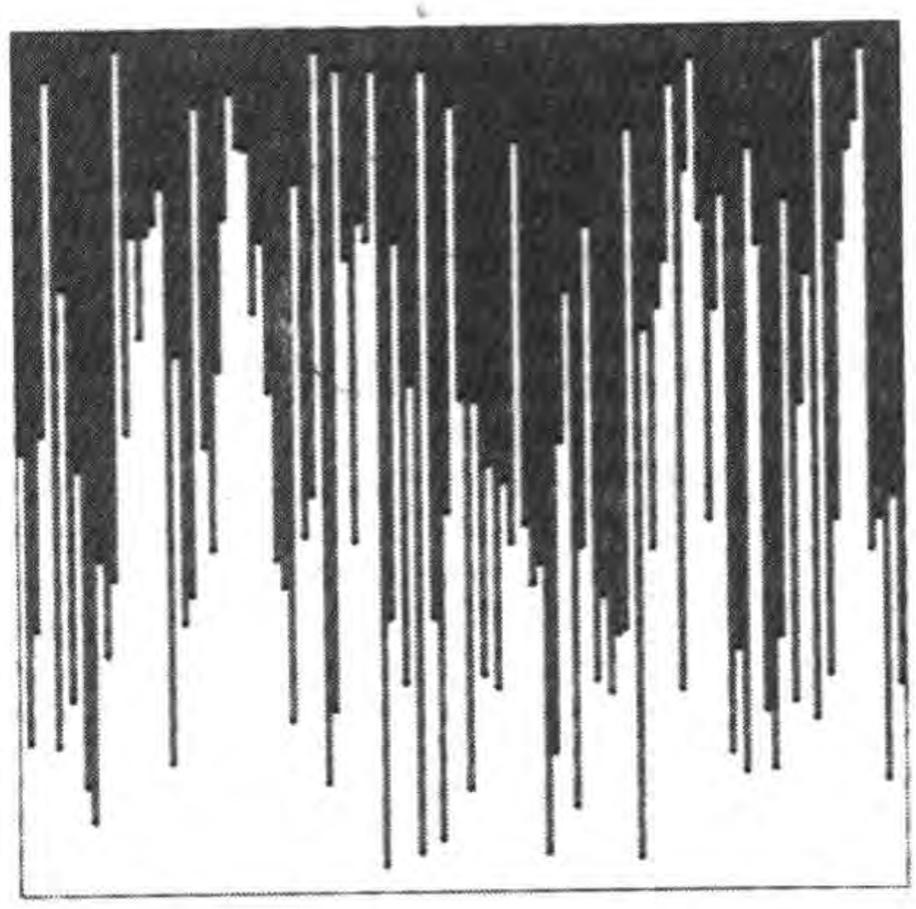


图 3.2　子弹在森林中可能的自由程(以惯常的南北水平面的横截面来看)。 在每一细长条上，精确地只有一棵有着共同直径宽度(黑圆)的树。 在长条上树的定位是随机选取的。 灰色区域标示着子弹可能的路径，覆盖了约一半的森林。

对于三维分子，问题将有所不同。 其原因有两点：首先，除了站在森林之外的人以外，我们必须考虑呆在里面的不同的人，每个人都背依着一棵树，向着同一个方向射击。 这会影响到前面计算中的因子 1/2(仅当在射击方向上只有几棵树时，森林外的人才需要考虑，如图 3.2；否则其作用可以忽略不计)。 其次，分子是球形的，而不

是像纸上所画的树的截面那样的圆。因此，它们不是一个切面(树的直径)，而是具有面积 $\pi\sigma^2$ 的圆，而为气体所占据的体积 V 将取代为树所占的区域。由此，取代平面情形下所得出的公式的，将是 $V = Nl\pi\sigma^2$，结果则是 $l = V/(N\pi\sigma^2)$，如上面所指出的。

借助于这一基本论证，我们把平均自由程的长度与乘积 $N\sigma^2$ 联系起来。这样通过测量平均自由程，我们可以弄清气体中分子的数目(在确定体积中)和大小。直接和间接两种方法所给出的大气压下的 l 的值都大约为百万分之一厘米。这样，我们就能在确定体积下得出 $N\sigma^2$ 的值。为了分别得到 N 和 σ，我们需要采用更精心的论证，这里我们就不再细述。有充分的理由可以说，(从 1865 年洛喜密脱开始)各种已提出的方法在这一点上是一致的，就是在一立方厘米中的分子数接近于 10^{19}(即 1 后面跟着 19 个零)。由此可推出，σ 约为 10^{-8}厘米的数量级，即一个厘米的一亿分之一。这意味着如果我们把一千万个分子挨个排成一列，这一列也只有一毫米长。

现在，幸运的是所有这些以极高的速度(在声速的数量级上)飞行的微小子弹，并没有飞行在同一个方向上。否则，它们将形成一股其速度令人恐怖的风，让我们难以承受。事实上，它们并非令人讨厌，而是对我们性命攸关的，因为它们允许我们去呼吸。所幸那些在前方撞击着我们的推力，为那些撞击我们背后的推力所抵消。它们不仅撞击着我们，或是房屋的墙壁，而且彼此相互碰撞，其碰撞频率在我们看来非常之高，但它们在两次碰撞之间，则通常要穿越百倍于它们自身大小的距离。当它们碰撞时，它们的路径发生了变化，散射向新的方向。于是每个分子持续地改变着它的路径，以至于尽管它的速度很快，但它要从出发点穿越一个较长的距离，总要走很长的时间。这可由观察一种气体进入另一种气体时的扩散来检验，或通过颜色使之可见，或使用香水使之可闻。

我们可以运用一个由麦克斯韦所得出的例子，来使在平静的空气中发生的情形形象化，这就是观察一群蜜蜂：当每只蜜蜂都劲头十足

地飞来飞去，一会儿朝着这个方向，一会儿又飞向那个方向时，蜂群整体或是保持静止，或是缓慢地在空气中移动。借助于一种某些蜂群主人在它们长途飞行时为识别它们而采用的手法，假设我们撒一把粉在蜂群上，使得那些此时处于蜂群下半部的蜜蜂变白。如果蜜蜂仍然以无规则的方式到处乱飞，蜂群上半部分中撒上粉的蜜蜂数量会不断增加，直到在蜂群各部分中达到同等的扩散程度。当然，扩散不是由于我们用粉来标识它们，而是由于它们的飞行。这一标识的惟一效用，就是使我们能识别出某些蜜蜂来。但如果我们对区分蜜蜂不感兴趣，我们仍然可能会对计算在某一层上撒上粉的蜜蜂的比例感兴趣，这完全是一种统计性质。

现在，我们还没有简单的办法，来标识一定选择数目的空气分子，以便在它们扩散到其他分子中以后，能追踪它们。然而，我们能很容易地传递给它们一些性质，并由这些性质来获取它们扩散的证据。我们可以在一确定方向上，输入一种所希望的运动，或对所选定的那部分空气供给一定的能量(通过使它与一运动的或热的墙相接触)。这样，这一性质通过扩散传输到其他地方。我们由此创造出所谓的输运过程，它在概念上和实际中都是有趣的。这里，没有实践上可行的办法，可以看出哪些分子在接近运动的或热的墙。但如果我们满足于一种统计说明，蜜蜂撒粉的例子应当说是很清楚的。

1860 年，克劳修斯在此概念基础上引入平均自由程两年之后，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(1831～1879)提出了诸如热传导、粘滞性和扩散之类的输运过程的初步理论。他同时评论说，假设所有的分子处于静止状态，而只有一个在运动，这一假设是过于简单化了：人们应当计算分子是如何相关于它们的速度而分布的。他因而引入了分布函数的概念(一种计算在一确定速度范围发现一个分子的概率的手段)。在同一篇论文中，他对于以他的名字命名的速度分布函数，给出了一个非常有启发性的推导。他考虑速度矢量 ξ，把这个同时给我们以运动的速度和方向的箭头投影到三维正交笛卡尔轴线上，得

到矢量 ξ 的三个分量 ξ_1、 ξ_2、 ξ_3。 然后，麦克斯韦凭着非凡的直觉，但却不够严格地得出，速度 ξ_1 的存在无论如何都不会影响到速度 ξ_2、 ξ_3 的存在，“因为它们都是直角相交，彼此独立”，所以人们可以假设速度的平方(即箭头长度的平方)具有一个概率分布，它是这三个分量的平方的概率分布的乘积。 由简单的数学论证可导出，其大小及每一分量，将服从统计学中著名的钟形曲线分布，这是由高斯首先引入以描述实验观察中的偶然错误的，被称为高斯分布。 而在分子运动论的语境中，出于明显的原因，所使用的名称是麦克斯韦分布。

近代分子运动论的发端和第二定律的证明问题

麦克斯韦几乎立刻就认识到，平均自由程的概念作为分子运动论的基础是不适当的。 他于 1867 年基于所谓的转移方程，提出了更为精确的方法，并且认识到一种分子模型的特别简单的性质。 按照这种模型，分子是以与距离的 5 次方成反比的排斥力超距相互作用的质点(因此并非硬球)，这些假想的分子今天通常被称为麦克斯韦分子。在同一篇论文中，他对他的关于处于平衡态的气体速度分布公式，作出了一个更好的证明。

借助于他的转移方程，麦克斯韦已经非常接近于一个分布函数的演化方程，但是这最后的一步无疑应归功于玻尔兹曼(1844～1906)，正如我们在下一章将会更充分地看到的。 所提到的这个演化方程通常称为玻尔兹曼方程，但有时也称作麦克斯韦-玻尔兹曼方程，以认可麦克斯韦在其发现中所起到的重要作用。 在下一章中讨论玻尔兹曼方程时，我们会更多地了解到麦克斯韦在这方面的工作。

此时，一个依然未能解决的重要问题，是热力学第二定律的推演问题。 正如人们在基础物理学中所熟知的，依据我们是仅仅考虑可逆过程，还是同样也考虑不可逆过程，这一原理可以分为两个部分。

关于物理学过程中的不可逆性这一近代观念，是建立在最普遍形

式的热力学第二定律的基础上的。如我们在上一章中所见，这一定律的首次提出，是萨迪·卡诺1824年的一篇论热机效率的论文。我们已经指出，他从事这一研究的目的，是出于一种非常实际的动机，即从确定的燃料中获取最大可能的功的问题。而这一分析，导致他得出了一个完全普遍性的定理，这一定理如埃米尔·克拉珀龙10年后所说，“提供了由固体、液体和气体中的热所导致的现象之间的共同联系”。这就是我们在上一章所讨论过的卡诺循环的观念。在卡诺论文发表25年之后，威廉·汤姆孙在看到这一成果时，仍然十分吃惊，认为“在整个自然哲学的领域内，再没有比通过这么一种推理过程来得出一般定律更为卓越的了”。如我们所知，卡诺极大地超前于他的时代，而且尽管他在论文中提到了热质，他只是少量地、谨慎地、批评性地运用了这一理论，并且甚至在他死后许多年才发表的论文中，反对热质理论。卡诺论证和卡诺循环的形式，通过克拉珀龙的解说，而为科学家们所广泛知晓，他把卡诺的“困难的和难以捉摸的论证链”转换成了更易于理解的数学讨论的形式。克拉珀龙大量地使用了热质的概念。在第二章中，讨论了热力学史中这一重要方面的一些细节。读者也可以参看本章中已经引述过的M.克莱因的相关论文。

在1850年前的科学文献中，可以发现有关热产生机械功时会有某些东西损失或耗散的零星论述，但直到1852年，才有威廉·汤姆孙(后来成为开尔文勋爵)断言“在自然界中有着机械能耗散的普遍倾向”存在。汤姆孙耗散原理的结论由赫尔曼·冯·亥姆霍茨加以加工，于两年后描述了宇宙的“热寂”，即所有能量转换为热的后果。值得强调的是，克劳修斯在1850年就已注意到，尽管卡诺论证稍加修改后，可以与功和热的等价相协调，但必须求助于比永动机的不可能性更多的东西，来作为公设。事实上，无论是第一定律(功与热的等价)，还是卡诺论证，都未能表明任何不可逆的特性，而热“总是显示出一种使温差扯平的趋势，因此总是从较热的物体传递到较冷的

物体上”。在克劳修斯的另一篇论文中，可以找到热力学第二定律的另一种更为精确、更为简洁的表述：“热决不会从较冷的物体传送到较高温度的物体，而同时不使其相关的周围环境发生任何变化。”

耗散原理的近代表述，是建立在克劳修斯 1866 年引入的熵概念的基础上的。尽管克劳修斯的表述并未增加任何新的物理内容，仅凭选择一个新的名称，以取代过去只是用数学公式和繁文晦语来表示的某种东西这一事实，无疑就对这一论题其后的发展，有着重要的影响。熵来自于希腊文 εντροπή，“变换”、“变化”、“演化”，但也有着“混乱”、“羞耻”的意思(这后一种意思，人们可以在希波克拉底的著作中以 έντροπία 的形式找到)。熵这一词的选取，是有意识地取其与能量一词的相似性；然而不同于能量在孤立系中的守恒，熵的性质是不减少(事实上它确实通常是增加的，这是不可逆过程的特征)。

事实上，克劳修斯证明，对于每一个热力学系统，都存在着一个系统的状态函数：它的熵，用 S 表示。其定义为一微分关系，即在一无穷短的时间间隔中，发生了一个时间上可逆的过程，其中系统的熵的增加 $\mathrm{d}S$ 为

$$\mathrm{d}S = \frac{\mathrm{d}^* Q}{T}$$

其中 $\mathrm{d}^* Q$ 是对于系统的热供给，T 是绝对温度。(记号 $\mathrm{d}^* Q$ 强调 Q 不是一个状态函数，因此在数学语言中，$\mathrm{d}^* Q$ 不是一个恰当微分)。对于不可逆过程而言，人们可以说在从一个平衡态通向另一平衡态的过程中，其熵增要大于同样两个态之间的可逆过程的熵的变化。

事实上，这一表述已经在实验的基础上证明为正确的，并且只立足于关于平衡态的考虑。以一种更为一般的形式(对于气体系统)来证明它的任务，要留待玻尔兹曼来完成。玻尔兹曼所使用的工具，正是分子运动论。而如我们已经看到的，这对于克劳修斯来说，也并非一无所知的。

我们注意到，偶尔有人评论说，卡诺所称作热的，实际上是熵，这在他的循环中是守恒的。尽管说卡诺发现了熵似乎是荒唐的，我们可以理解为什么他的论证是成功的，以及为什么克劳修斯和汤姆孙能挽救他的循环，并把它结合进这一新学科中。从根本上说，他意识到了在可逆过程中，有着某种东西是守恒的，这不是热，也不是热质，而是以后被称作熵的东西。

当把物质描述为分子的集合，而不是连续体时，与可逆性相关的问题，首先是以几乎被作为一个笑话、而现在被称为“麦克斯韦妖”的发明而表现的。如我们已知，麦克斯韦在 1860 年就已发现了他的速度分布定律，而在气体分子的随机运动中，较高的温度对应于较高的速度，则已是公共的知识。1867 年，在与 P.G.泰特和 W.汤姆孙的讨论中，他设想有一种存在物，它有着非常敏锐的能力，能追踪每一个分子的运动。这种“妖”首次出现于麦克斯韦 1867 年给泰特的一封信中，但它第一次公开露面，则是在麦克斯韦发表于 1871 年的《热学理论》中。

想象这么一种生物，微小而又非常活跃，有能力看见单个分子，并且有足够的敏捷以操纵它们，就像一位网球冠军对付网球那样。这样一种妖通过打开和关闭把一个装满气体的容器一分为二的墙上的一个微观的小孔，能成功地克服熵增定律，即只有那些最快的分子可以单向通过小孔，而最慢的分子都留在另一边。给定分子大小和小孔的大小，开关门的功是可忽略的。这样，这个妖就能在一个分隔间里提高温度，而实质上并未作功，这正是热力学第二定律所禁戒的。这一假想构造的关键点，在于这一定律在分子层次上并非必然是真的。事实上，具有麦克斯韦所指派给它的特性的这种妖在物理上是不可能存在的。我们当然会想到用一个能模仿它的能力的机器来取代它，然而计算的结果是，考虑到它所需要的结构的复杂性，这种装置在减少其环境的熵时，会增加它自身的熵。

麦克斯韦妖的发明，表明麦克斯韦多么清楚地看到了问题的核

心。然而我们却失望地面对着这么一个事实：他关于第二定律统计特性的论述尽管不乏深刻，但却是片断的。在这方面，M.克莱因所引的一段泰特关于麦克斯韦科学探究的特征的说法是恰当的："这个人的根本特征，就在于对于任何现象，他的大脑在没有弄清其本质和原因之前，绝不会放其过关。"

首先尝试基于分子运动论来说明第二定律的是兰金。他假设原子轨迹在热力学变换中不变，并因此受到玻尔兹曼的批评，因为这一假设与在所说的变换中系统所经历的形变不相容。

玻尔兹曼自己在这一领域中的第一篇文章，则试图从纯力学定理出发，去证明第二定律，其假设是有相当限制性的，即分子的运动是周期性的，周期为 τ。其评说则虽然不顺理成章，但却或许是可辩护的，即"如果轨道在有限的时间内不闭合，人们可以设想它在无限的时间中是会闭合的"。从根本上讲，玻尔兹曼说温度可以被看作是分子运动能的时间平均，而热可以与分子运动能的平均增加相等。如果我们从一种关系去计算未特别指定的周期，并把结果代入另一个，就可以证明热为温度所除是一个恰当微分。文章的这一部分，看上去是对于热力学第二定律的第一部分的相当初步的辩护。而对于第二部分，玻尔兹曼的论证则更多地是属于纯热力学，而不是统计力学的，其结论是在不可逆过程中，熵必然是增加的。

在 1866 年，玻尔兹曼还是个小人物，他的论文也没有引起注意。因此，克劳修斯未曾读过它也就不足为奇，他于五年后发表了一篇完全类似的文章。玻尔兹曼于是准备发表一篇评论，他逐字逐句地引述了先前的论文达 10 页之多，并得出结论说："我想我已经确立了自己的优先权。最后，我想表达我的愉悦，因为有像克劳修斯博士这样的权威，来为包含在我的关于热的力学理论的论文中的观念的传播作出贡献。"

克劳修斯承认了玻尔兹曼的优先权，并为近年来他很少有时间来关注这一主题而道歉。他也加上了一句，按照他的见解，玻尔兹

曼的论证不像他自己的那么普遍。玻尔兹曼没有回答这一评论。此时，如我们在下一章中会看到的，他的科学兴趣已经走上了另一条道路。

正如克莱因所评说的："麦克斯韦观察到了这一点，并在以后关于第二定律的力学解释的争论中，取一种超然、但不无消遣的态度。"用麦克斯韦的话来说：

> 看着这些博学的德国人争夺发现热力学第二定律立足于哈密顿原理的优先权，真是一种难得的娱乐。他们总是假设物体的温度不是别的，正是它的分子中相应物的代名词，而这种想法可由盖·吕萨克、杜隆等的工作中联想得出，但却首先是由 dp/dt（麦克斯韦自己的一个笔名，为什么会选这么一个怪名的详情，可见克莱因的论文从动力学考虑中推演得出的。此时，哈密顿原理正在不为统计思想所苦恼的境界里一路高翔，而德国的伊卡洛斯[1]却在那因不可见的朱诺[2]的无法表达的属性所造成的人类科学的无知与局限的迷雾中，拍打着他们蜡制的翅膀。（摘自麦克斯韦于 1873 年 12 月 1 日给泰特的信）

为什么麦克斯韦会如此嘲笑"这些博学的德国人"呢？因为他们正在争夺的奖金只是一个幻影。正如他对用他的名字所命名的妖所进行的讨论所表明的，他已经明白，如果热是运动，那么第二定律"就等价于否认我们有能力从事刚刚所描述的操作（即把热转换为普通的运动），无论是通过一系列机械装置，还是通过其他已发现的方法。因此，如果热就存在于其组成部分的运动中，则这些运动着的部分必定非常小，以至于我们无法抓住它们，使它们停止下来"。

[1] 古希腊神话中建筑师和雕刻家代达罗斯之子，逃亡时因飞近太阳，装在身上的蜡翼遇热熔化，堕海而死。——译注

[2] 神话中的天后。——译注

换句话说，第二定律表达了一种对于我们以通常的宏观手段，来作用于那些微小的对象，即原子的可能性的限制。

至于克劳修斯，则总是执着于他的更为力学性的观点。他对于概率的运用似乎本质上只限于平均值的使用。这里，引用吉布斯在克劳修斯的悼词中的话是恰当的："当阅读克劳修斯的时候，我们就好像是在阅读力学；在阅读麦克斯韦的时候，以及在阅读玻尔兹曼的大部分有价值的工作的时候，我们更像是在阅读概率理论。"

玻尔兹曼还没有能发现关于第二定律的统计本性的简单而又根本性的真理。他的通往自己的统计研究的痛苦的道路，尤其是清楚地理解他自己的成功发现的基本意义，要在下面的几章描述。另一方面，麦克斯韦看来也未能觉察玻尔兹曼的成果，即所谓的 H 定理的重要性，这或许是因为他把它归之于不为统计思索所烦恼的领域中去的缘故。我们会在第十一章再回到这一问题。这里，我们必须作一评论。如果一位像麦克斯韦这种地位的科学家，也未觉察出一项成果的重要性，然而正是这项成果提供给我们一种方式，以量度我们在把热转换为通常运动时的无能为力，那么对于当代人的不能理解玻尔兹曼发现的意义，我们就会抱有更多的同情。本书的读者必须耐心，如果他想理解的话。我们之所以缓慢地进展，正是由于论题的困难和易错的危险。事实上，我们现在已经抵达书中的这一点，以至于我们可以像(古罗马诗人)维吉尔那样说：让我们来唱出些更伟大点儿的事物吧。

第四章

玻尔兹曼方程

不可逆性与分子运动论

正如上一章中所述，在分子运动论中，不可逆性问题是随着玻尔兹曼而成为最前沿的。1872 年，他不仅推导出冠以他的名字的方程，而且引入了以分子速度的分布函数来表示的熵的定义。他证明了作为他的方程的一个推论，他所定义的熵必然总是增加的，或至少是保持不变的(在统计平衡的情形中)。本章主要讨论由玻尔兹曼发现的这一基本方程，而把分子运动论中与不可逆性相关的方面留到第五章中去讨论。这么做是为了说明上的清晰起见，尽管从历史的角度看不太精确，因为看来正是第二个问题构成了玻尔兹曼写作论文的主要动机。

在写作这篇论文之前，玻尔兹曼已经掌握了我们提到过的麦克斯

韦的技巧。1868年，他已经把麦克斯韦分布拓展到分子处于力场与势平衡的情形，包括多分子的情形。并把我们在第九章要详细讨论的能量均分定理，也拓展到了多分子情形。其间，他还建立起了与基尔霍夫和亥姆霍茨之间的联系。

如克莱因所注意到的，玻尔兹曼以两种不同方式来解释麦克斯韦的分布函数，而他似乎认为它们是先验地等价的：第一种方式立足于足够长时间间隔的片断，其间，一个特定分子的速度值在速度空间的某个体积元中；而第二种方式(在论文的脚注中所引)则立足于一小部分分子，它们在某一瞬间有着在所说的体积元中的速度。看来清楚的是，玻尔兹曼在当时觉得没有必要去分析这两种意义如此不同的方式之间的等价，它是很含糊地被假设的。然而，他很快就意识到(论文的脚注)，有必要对于实在的物体作出一个相关的、“并非不可能的”假设：它们是由正在运动的分子组成的，因为它们拥有“我们称之为热的运动”。按照这一假设，处于平衡态的分子的坐标和速度，可取所有与确定的气体总能量相容的数值。这一假设后来成为人们所熟悉的**各态历经假说**，其名称是由保罗和塔蒂阿那·埃伦菲斯特所取的。我们把关于这一问题的讨论留到第七章——关于平衡态统计力学中去讨论。

在着手讨论1872年的基本论文之前，我们注意到，在1871年，玻尔兹曼觉得已为重新理解第二定律作好了准备，从他以前获得的平衡定律出发，来澄清热与功之间的不同。如他以前所做，并在克劳修斯和麦克斯韦的工作之后已成为共识的，他把用T来标示并称为温度的东西，与每个原子的平均动能划等号。这样他就用不着所谓的玻尔兹曼常数，这一常数是相当迟才由普朗克引进的。这一等同，除了一个因子之外，只有当热能与温度之间存在一比例时，其辩护才是顺理成章的，而这只适用于理想气体和室温下的固体。温度的概念确实是相当微妙的，因为它没有直接的力学意义。从更为现代的眼光来看，如我们在下面会看到的，为玻尔兹曼在分子运动论(加上

热能)中所引入的熵的概念，看起来更为基本(尽管不那么直观)，而温度则是一个有限度的概念，仅对平衡态才有严格的意义。

然而，这些问题并没有影响到为玻尔兹曼所思考的平衡态，我们可以没有异议地接受他的等同。当时很清楚，作为动能与势能之和的总能量 E，将会有下面的平均值：

$$\langle E\rangle = NT + \langle X\rangle \tag{4.1}$$

其中 X 是势能，$\langle q\rangle$ 表示一个量 q 的平均值，而 N 为总的分子数。因此，显然人们可以通过两种方式来改变 $\langle E\rangle$ 的值，即或是改变温度，或是改变势的平均值，这种改变非常缓慢，使得它所经过的是平衡态，得出

$$\delta\langle E\rangle = N\delta T + \delta\langle X\rangle \tag{4.2}$$

其中 δ 表示一无穷小的变化。如果我们用 $\delta * Q$ 来表示在此过程中提供给系统的热，并且由平均总能量的增加和对系统所作的平均功的差来计算它，则有：

$$\delta * Q = \delta\langle E\rangle - \langle\delta X\rangle = N\delta T + \delta\langle X\rangle - \delta\langle X\rangle \tag{4.3}$$

我们注意到 $\delta\langle X\rangle$ 和 $\langle\delta X\rangle$ 是不同的。事实上，取平均这一计算依赖于某个宏观量，最典型的是温度，它在我们所思考的过程中是可以改变的。因此，如果我们先取势的平均，然后再观察这一平均值的变化(它依赖于温度)，和先计算 X 的变化(它不依赖于温度)，然后再对其取平均，这二者是不同的。

方程(4.3)中的表式并非某个状态函数 Q 的微分，这一情形由于影响到 δ 的星号的出现而凸显出来。然而玻尔兹曼证明，如果我们用 T 来除所考虑的表式，就会得到一个函数的恰当微分，他把这一恰当微分认定为熵。由此，他已得到了对于可逆过程的第二定律的实质性内容。他还进而去清晰地计算理想气体和简单的固体模型的

熵，从而在第一种情形中，得出了热力学中的一个著名结果，在第二种情形中则得出关于比热容的杜隆-珀替定律。

即使是那些熟悉通常的热力学计算的人，也会觉得这一点是奇怪的，即对系统所做的功是由于势的变化，而不是由于一个活塞的运动。但只要人们假定了平衡分布是如今称作麦克斯韦-玻尔兹曼分布，并多少被认作为标准的分布，玻尔兹曼所作的推导就是无懈可击的。

1872 年的重要论文

上一节所讨论的玻尔兹曼的论文是向前迈进的重要一步。然而，那是一种排除了不可逆现象的处理方法，否则也得不出这样的结果，因为所说的分布只适用于平衡态。但自那时起，玻尔兹曼就已准备好迈出最后的一步，即在本章题目所指的一个新的积分-差分方程的基础上，把统计处理扩展到不可逆现象。一旦他确认了这一成果，他想先在玻根多夫的《物理学年鉴》上发表一篇较短的论文，以保证他对于这项发现的优先权，然后再精心加工成完整的形式，以提交给维也纳的科学院。由于斯忒藩反对相同的内容被发表两次，我们所面对的，只能是长达近百页的提交给科学院的研究报告。这或许可以说明为什么要以下述奇怪的题目来提交丰富的新的成果："关于气体热平衡的进一步研究"。

这篇论文从对麦克斯韦所提出的平衡态气体中速度分布推导的批评开始，强调事实上这一推导只是表明，麦克斯韦分布一旦达到就不再会因碰撞而改变。然而玻尔兹曼说："尚未证明无论起始条件如何，都将趋于麦克斯韦所发现的这一极限。"当写出这一表述时，玻尔兹曼显然想到的是空间均匀的情形，他提交的报告中第一部分事实上讨论的正是这一问题。

在"对于碰撞过程的正确处理"的基础上，他得出了一个关于分布函数的方程，这个分布函数通常用 f 或 $P^{(1)}$，或简单地用 P 表示，

即在某个时间瞬间 t，在某一位置 x，发现一个速度为 ξ 的分子的概率密度(我们将很快给 f 以一个更准确的定义)。

在这份报告的第一部分，他把自己限于 f 仅依赖于时间和动能的情形。这一方程在那些头脑中已习惯于这一方程的现代形式的人看来，或许有些奇怪，不仅仅是因为它用字母 x 来表示动能。事实上，由于把这一变量作为独立变量，而不是速度的变量，他在方程中引入了几个平方根。这是由于这样一个事实，即其量度在系统演化中不随时间而改变的体积元(得益于刘维尔定理)，包含速度空间 $d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3$ 中的体积元。把变量变换到极坐标中，除了立体角元外，还能得到元 $|\xi|^2 d|\xi|$，或是在用动能 E_{kin} 表示时除去常数因子后，得出 $(E_{kin})^{1/2} dE_{kin}$。令人好奇的是，如果人们在二维中进行同样的计算，带有 1/2 次方的因子或等价的玻尔兹曼平方根却消失了。

借助于他的方程，玻尔兹曼不仅证明了麦克斯韦分布是这一方程的稳定解，而且证明了不可能发现有其他这样的解。这一目标是通过引入一个量来实现的，这个量证明为不仅是一个常数因子，而且是与熵相对立的。以分布函数来表示熵的可能性，尽管在某种意义上并非不可想象，但仍然代表着一个引人注目的事实，它必然对玻尔兹曼的同时代人产生深刻的印象。事实上，正如作者自己注意到的，这意味着一种全然不同的证明第二定律的途径，这不仅证明了对于平衡态熵函数的存在，而且也允许人们去研究它在不可逆过程中的增加，我们将在下一章涉及问题的这一方面。

这篇论文接下来讨论了另一种立足于离散能量模型的推导，其中关于分布函数的微分-差分方程成为一个通常的非线性微分方程系统。对玻尔兹曼来说，离散能量的运用看上去总是“非常清楚和直观的”，如我们在第六章同样会看到的。他的这一表述听起来好像很天真，但它也可能表明了一种对趋向平衡的严格证明难度的惊人直觉，我们将在下一章再回到这个问题。作为一个事实，如果我们所处理的是一个离散的、有限的方程系，刚刚提到的这些在证明这一趋

势中所遇到的困难就消失了。因为未知数 f 在任何时间瞬间，都是一组有限的数字，而不是一个函数(用数学中的行话来说，应当说我们处理的是一个有限维度空间，而不是一个函数空间)。这种简单化允许我们使用一个在玻尔兹曼时代已经为人所知的性质(所谓的玻尔扎诺-魏尔斯特拉斯定理)，以无需特别精巧的数学论证，就能推演出所考虑的这一趋势。

许多科学史家都强调玻尔兹曼所用的这些离散模型导致了普朗克发现他的能量子，普朗克自己也是这么承认的，我们会在第十二章来讨论这一问题。

在玻尔兹曼的这篇大部头的研究报告中，只有几页涉及气体中输运性质的计算。然而正是在这几页里，玻尔兹曼奠定了其方程最为我们熟知的形式，其中分布函数依赖于时间 t、速度 ξ 和位置 x(矢量标记当然是与现时代不符的)。他的计算表明，粘滞性、热传导和扩散系数都能用他的方程来计算，对于我们在前一章中已提到的麦克斯韦分子来说，其结果也与麦克斯韦的一致。然而，玻尔兹曼警告他的读者，不应幻想能轻易地把他的计算推广到更复杂的相互作用定律中去。

为了说明玻尔兹曼在这篇极其重要的论文中的贡献，我们应当从这最后的部分开始。我们应运用一种与现时不符的方法，不仅是为了标记，也是为了论证。因为否则就不可能以一种可理解的和较短的形式来讨论这一话题。

如前所述，除非另有说明，我们应把分子想象为坚硬的、弹性的和完全光滑的球。这一选择不仅简化了我们的表述，同时也与经验相当吻合。运用更精细的模型，在数量上会改进这种吻合，而从概念的观点看则并没有什么变化。

为了讨论 N 个(全同)硬球组成的系统的行为，引入所谓的相空间，即 $6N$ 维空间是十分方便的，其中的笛卡儿坐标是球心 X_i 的 N 个位置矢量的 $3N$ 个分量，和 N 个速度矢量 ξ_i 的 $3N$ 个分量。在这个空间中，系统的状态如果是绝对精确地知道的话，是以上述坐标系

中的一个确定点来表征的。在方便的时候，我们会谈到速度空间(一个 $3N$ 维的空间，其中的笛卡儿坐标为 N 个速度矢量的 $3N$ 个分量)和位形空间(一个 $3N$ 维的空间，其中笛卡儿坐标为 N 个球心 X_i 位置矢量的 $3N$ 个分量)。

让我们用 z 来表示相空间中这一点的 $6N$ 维位置矢量。如果状态不能绝对精确地知道，则我们必须引入相空间的概率分布 $P(z, t)$，则在时间 t 时在相空间的一个区域 D 中发现 z 的概率为

$$\mathrm{Prob}(z \in D) = \int_D^{P(z,\ t)} \mathrm{d}z, \tag{4.4}$$

其中 $\mathrm{d}z$ 表示相空间中的体积元。方程(4.4)给我们以 P 的精确定义。

给定 P 在 $t = 0$ 时的值 $P_0(z)$，假定我们有一个表述其随时间变化的方程，则可以计算 $P(z, t)(t \geqslant 0)$。这里，我们遇到这么一个事实，即硬球随时间的变化是不连续的。事实上，当两个球碰撞时，它们的速度瞬间从确定的值(它们在相互趋近时所拥有的值)变化为别的确定值(当它们彼此分开时所拥有的值)。为解决这一困难，我们首先删除相空间中那些对应于重叠领域的部分，然后在剩余区域的边缘加上合适的边界条件。下面，我们将用 Λ 来表示在删除了部分重合区域后所得到的位形空间的子集，即 Λ 为允许系统所处的位置的集。由相点 z_0 所确定的起始状态随时间的演化，将把它在时间 t 带到另一与点 z_t 相联系的态。这一点于是惟一地确定(除了碰撞的瞬间外)，如果那些引起了三重或更高阶碰撞及那些在有限时间内引起无穷多碰撞的相空间点的集 ζ_0 被忽略的话。今天，从数学角度上讲，我们有了很好的工具来讨论这些看上去可疑的假设。事实上，具有一个上述集 ζ_0 的起始态的概率，严格说来为0(在 ζ_0 的体积在相空间中为 0 的意义上)。

方程(4.4)中的概率等于这样一些表征点的概率，它们在 $t = 0$ 时，在由点 Z_0 所组成的区域 D_0 中，而随时间演化，将在时间 t 结束于 D 中。于是：

$$\int_D^{P(z,\ t)} \mathrm{d}z = \int_{D_0}^{P_0(z_0)} \mathrm{d}z_0. \tag{4.5}$$

我们现在可以利用这一事实，即属于 D 的点 z 的集合，恰好与从属于 D_0 的点 z_0 随时间演化而得到的点的集合相一致，并得出在相当广泛的条件下，$P(z_t,\ t) = P_0(Z_0)$，沿着系统在相空间中的轨迹，概率密度保持不变。

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = 0, \tag{4.6}$$

其中对时间的导数当然是沿着轨迹进行的。通过以一种清晰的形式写出的这一导数，我们得到了支配函数 P 的依时间演化的所谓刘维尔方程。

我们刚才提到的刘维尔方程是一个有用的概念工具，但却不能用于实际的计算，这是因为未知数所依赖的实变量的数目极大（10^{20} 次方的量级）。这一点在麦克斯韦和玻尔兹曼开始求单粒子的概率密度，或是分布函数 $P^{(1)}(x,\ \xi,\ t)$ 时就已经认识到了。后者不同于我们迄今所用的函数 $P(z,\ t)$，仅依赖于七个真实的变量，即两个矢量 x 和 ξ 的分量和时间 t。尤其是玻尔兹曼，他借助于辅助论证，写出了 $P^{(1)}$ 的演化方程，我们将以指明在何处引入了额外假设的方式，来向读者介绍这一推导过程。

首先，让我们考虑论证 $P^{(1)}(x,\ \xi,\ t)$ 的意义，它给出了在与一个粒子的位置和速度相联系的六维约化空间中的某一点 $(x,\ \xi)$，发现一确定粒子（比方说，标记为 1 的粒子）的概率密度。由此，显然在 $P^{(1)}$ 和 P 之间有一简单的关系，事实上

$$P^{(1)}(x_1,\ \xi_1,\ t) = \int_{\Omega^{N-1}\times k^{3N-3}} P(x_1,\ \xi_1,\ x_2,\ \xi_2,\ \cdots,\ x_N,\ \xi_N,\ t)\mathrm{d}x_2\mathrm{d}\xi_2,\ \cdots\mathrm{d}x_N\mathrm{d}\xi_N \tag{4.7}$$

因为 $P^{(1)}$ 是在某一状态发现第一个粒子的概率，不论标记为 2，3……N 的粒子状态如何。［在方程(2.1)中，Ω 表示在物理空间中

为气体所占据的区域(例如，一个容器的内部)，它由 $N-1$ 个分子的 $N-1$ 个位置矢量中的每一个描述，而 k 表示为同样这些分子的 $N-1$ 个速度的 $3N-3$ 个分量中的每个所描述的实轴]。这样原则上，$P^{(1)}$ 的演化包含在刘维尔方程中，这一点在以后将会用到，但在目前暂且忽略。事实上，能由刘维尔方程得出的 $P^{(1)}$ 的恰当方程，包含着双粒子方程 $P^{(2)}$(见下面)；一个仅包含 $P^{(1)}$ 的方程在处理问题中是非常重要的一步。这也正是为玻尔兹曼所发现，并用他的名字命名的方程。这里，我们不是从刘维尔方程出发，而是试图基于 $P^{(1)}$ 的物理意义，写出它的方程。

注意，当不存在碰撞时，$P^{(1)}$ 将满足与 P 相同的方程，即方程(4.6)，除了对时间的求导是沿着 6 维空间，而不是 $6N$ 维空间中的轨迹进行之外。相应地，我们必须评估的影响是碰撞对于 $P^{(1)}$ 的依时演化的影响。注意到碰撞发生的概率，是与恰好在分布函数 $P^{(1)}$ 的第一个分子的直径距离上，发现另一个分子的中心相关的，因此一般而言，为了写出 $P^{(1)}$ 的变化方程，我们需要另一个函数 $P^{(2)}$，它给出在时间 t，发现第一个分子以速度 ξ_1 处于 x_1，而第二个分子以速度 ξ_2 处于 x_2 的概率，显然，$P^{(2)}=P^{(2)}(x_1, \xi_1, x_2, \xi_2, t)$。一般地，我们得出

$$\frac{\mathrm{d}P^{(1)}}{\mathrm{d}t}=G-L. \tag{4.8}$$

其中 $L\mathrm{d}x_1\mathrm{d}\xi_1\mathrm{d}t$ 给出了预期位置在 x_1 和 $x_1+\mathrm{d}x_1$ 之间，速度在 ξ_1 和 $\xi_1+\mathrm{d}\xi_1$ 之间，却由于在时间间隔 $t+\mathrm{d}t$ 中的碰撞而从这些值域中消失的粒子数，而 $G\mathrm{d}x_1\mathrm{d}\xi_1\mathrm{d}t$ 给出的是在相同的时间间隔中，进入相同值域的类似的粒子数。这些数目的计算类似于计算从分子到碰撞壁的动量转换，假如我们还是用那一手法，设想粒子 1 为一静止球，具有两倍于实际直径 σ 的直径，而其他粒子则为速度为 $v_i=\xi_i-\xi_1$ 的质点。事实上，每一次碰撞都将把粒子 1 送出上述集合，而它的碰撞数将是任何其他质点与此球预期的碰撞数。由于

准确地说有 $(N-1)$ 个同一的质点，而多重碰撞可以忽略，$G=(N-1)g$，而 $L=(N-1)l$，其中小写字母表示的是确定粒子(例如粒子 2)的贡献。

至此，我们已经准备好来理解玻尔兹曼的论证。在气体、即使是稀薄的气体中，N 也依然是一个很大的数目，而 σ(用适合于我们日常面对的物体的单位，例如厘米来表示)则是非常小的。为观念上确定起见，让我们设想一个在室温和大气压下，体积为 1 立方厘米的小盒子，则 $N \cong 10^{20}$ 个，而 $\sigma=10^{-8}$ 厘米。于是，$(N-1)\sigma^2 \cong N\sigma^2=10^4$ 平方厘米 $=1$ 平方米，是相当大的量，而我们可以忽略 x_1 和 $x_1+\sigma n$ 之间的差别，其中 n 是指向 x_2-x_1 方向上的单位矢量(在碰撞发生的瞬间，后一矢量的大小显然等于分子的直径 σ)。这引导我们想到所写出的方程仅在所谓的玻尔兹曼-格拉德极限，即 $N\to\infty$，$\sigma\to 0$，而 $N\sigma^2$ 有限时才严格有效。

此外，由于分子所占体积约为 $N\sigma^3 \cong 10^{-4}$ 立方厘米，发生在两个预先挑选好的粒子之间的碰撞是非常罕见的事件。因此，两个球的偶尔碰撞可被看作是两个随机选择的分子。这就使得下述说法成立：发现第一个分子在 x_1 并有速度 ξ_1，而第二个分子在 x_2 并有速度 ξ_2 的概率密度，为发现第一个分子在 x_1 并有速度 ξ_1 的概率密度，乘以发现第二个分子在 x_2 并有速度 ξ_2 的概率密度。

这些考虑可以在一个更一般的框架中得到理解，这个框架是用来发展下述观点的：连续描述和分子描述具有共同的有效性基础这一事实，引出了如下观念：我们可以发展出一种方法，允许从一个微观的模型出发，严格地演绎出宏观的方程来。这种方法本质上基于这一观念：宏观行为是作为微观定律的极限而出现的，其根本原因是由于参与作用的分子的数目极大。

这是一种我们理解不同的描述层次上自然现象的更一般看法的一部分。粗略的描述对应于我们日常生活中遇到的现象，但我们必须深入到更底层，去理解某类宏观现象背后的原因，去获取更精确的规律。

眼下，我们先承认稀薄气体中偶然相遇的两个分子的统计独立性观念，但在后面会回来证明它。因此，对两个将要碰撞的分子，我们写出(假设分子混沌)：

$$P^{(2)}(x_1, \xi_1, x_2, \xi_2, t) = P^{(1)}(x_1, \xi_1, t)P^{(1)}(x_2, \xi_2, t) \tag{4.9}$$

或是：

$$P^{(2)}(x_1, \xi_1, x_1 + \sigma n, \xi_2, t) = P^{(1)}(x_1, \xi_1, t)P^{(1)}(x_1 + \sigma n, \xi_2, t)$$

$$\text{对于}(\xi_2 - \xi_1) \cdot n < 0 \tag{4.10}$$

如果我们承认所有为玻尔兹曼所作出的简单化假设(多少是不清晰的)，则对于获取项和失去项，我们仍然可得到仅包含 $P^{(1)}$ 的表达式：事实上函数 $P^{(2)}$ 像 $P^{(1)}$ 一样，在碰撞中是连续的，而不管事实上分子速度经历了不连续的转换。这样，人们可以把碰撞后 $P^{(2)}$ 的值等同于同一碰撞前的值(当然，是对于不同的速度值)，并只应用方程(4.10)于碰撞前所流行的分布。

对玻尔兹曼研究方法的一种批评

玻尔兹曼方程是 $P^{(1)}$ 的演化方程，其中完全没有涉及 $P^{(2)}$ 或 P，这是其主要的优点。然而，其代价是几个假设。其中尤其是方程(4.10)中的混沌假设，是一个很强的假设，需要进一步讨论。在这一领域，主要的困难是区分概率论证和动力学论证。事实上，使得结果可以接受并避免了悖谬的概率的运用，正出自于纯动力学解释。

方程(4.10)中所假设的分子混沌显然是一种随机性质。直观上讲，人们觉得碰撞施加了一种随机的影响，通过进一步的思考，会使它变得更令人信服。但如果争辩说，为方程(4.10)所描述的统计独立

性是动力学的结果(如玻尔兹曼在关于他的方程的第一篇论文中似乎主张的那样)，那就完全错了。非常清楚，我们不可能指望，对 P 的初始值的每一个选择都能给出与玻尔兹曼方程在玻尔兹曼-格拉德极限下的解相符的 $P^{(1)}$(由于刘维尔方程是线性的，其初始数据中的每一个都假设 $P^{(1)}$ 与玻尔兹曼方程相符，但其和的一半却不能给出同样的相符，因为玻尔兹曼方程是非线性的)。换言之，分子混沌在起始时必须出现，我们只能问在硬球系统的随时间变化中，它是否会保持下去。

显然，如果混沌性质(4.10)在起始时出现，会立即被破坏，至少如果我们坚持它应当处处有效的话。事实上，如果它在相空间中的任何点有效，玻尔兹曼-格拉德极限中的获取项和失去项就会严格相等，从而在 $P^{(1)}$ 的随时间变化中，就不会有碰撞效应。关键在于我们仅对于那些将要碰撞即正处于方程(4.10)形式的分子需要混沌性质。因此显然，即使 $P^{(1)}$ 如刘维尔方程所预言的那样，很好地收敛于玻尔兹曼方程的一个解，$P^{(2)}$ 碰撞也仅会在一种确实非常稀罕的意义上，收敛于如(4.10)所说的一个乘积。事实上，仅表明收敛发生于所有相空间中的点是不够的，除非能表明它发生于零体积集合的那些点，因为我们需要在零体积集合(对应于将要碰撞的分子状态)中，运用混沌性质。另一方面，我们无法表明收敛处处成立，因为这是错误的。事实上，我们刚刚注意到，一般而言，对那些刚刚发生过碰撞的分子，(4.10)明显是错误的。

我们如何能无需求助于分子混沌假设作为一个先验假说，来解决证明玻尔兹曼方程的问题呢？显然，由于 $P^{(2)}$ 出现在 $P^{(1)}$ 演化方程中，我们必须研究 $P^{(2)}$ 随时间变化的方程；而显然，$P^{(2)}$ 随时间变化的方程中将包含另一个函数 $P^{(3)}$，它依赖于时间与三个分子的位置和速度，给出了在时间 t，发现第一个分子处于 x_1 并有速度 ξ_1，第二个分子处于 x_2，有速度 ξ_2，第三个分子处于 x_3，有速度 ξ_3 的概率密度。一般地，如果我们引入函数 $P^{(s)} = P^{(s)}(x_1, x_2, \cdots, x_s, \xi_1, \xi_2, \cdots \xi_s, t)$，即所谓的分子 s 的分布函数，它给出

了在时间 t，发现第一个分子处于 x_1 并有速度 ξ_1，第二个分子处于 x_2，有速度 ξ_2，……第 s 个分子处于 x_s，有速度 ξ_s 的概率密度；我们发现 $P^{(s)}$ 的演化方程中，包含有下一个函数 $P^{(s+1)}$，直到得到 $s = N$，而事实上 N 与 P 并无不同，且满足刘维尔方程。这样，显然我们无法进展，除非我们同时处理所有的 $P^{(s)}$，并证明一个一般化的分子混沌形式，即

$$P^{(s)}(x_1, \xi_1, x_2, \xi_2, \cdots, x_s, \xi_s, t) = \prod_{j=1}^{s} P^{(1)}(x_j, \xi_j, t), \tag{4.11}$$

其中 $\prod_{j=1}^{s} F_j$（不管 F_j 是什么）意味着我们必须用因子 F_1，F_2，F_3，$\cdots F_S$ 来乘 s。

于是，任务就成为如果在时间 $t = 0$ 时成立，证明在玻尔兹曼-格拉德极限下，这一性质（对任何确定的 s）将得以保持，并对任何将要碰撞的分子都将保持。

仍然存在的问题是如何证明起始混沌假设，按照这一假设，在 $t = 0$ 时，方程(4.11)得到满足。我们可给出两种证明，一种是物理的，另一种是数学的；但本质上它们说的是一回事，即很难准备一种方程(4.11)不成立的起始状态。关于这一点的物理原因，在于一般来说，我们不可能处理单个分子，而是把气体作为一个整体来处理；而如果我们作用于宏观层次上，则通常从一个平衡态出发[对它方程(4.11)成立]。数学论证指出，如果我们对于处于随机状态的分子，选择起始数据，则存在一个压倒性的概率，方程(4.11)在 $t = 0$ 时满足它。

从物理学的角度所作的这一澄清，是由埃伦菲斯特完成的，而由数学上的严格证明所引出的问题，只是部分地解决了。接下去的步骤将在下一章简略地讨论。应当提到的一点，是边界条件问题。当证明混沌在极限下保持时，绝对需要与方程(4.11)相容的边界条件

（至少在极限内）。如果边界条件是周期性或镜面反射，则不会有任何问题发生。更一般地，当分子以一种不依赖于气体中其他分子的状态的方式，从边界上无吸附作用地散射，它就是充分的。

这里，对上一章提过的麦克斯韦输运方程稍作评论或许是合适的。它们实际上非常接近于玻尔兹曼方程，尽管并没有迹象表明，麦克斯韦想到过它们可以被用来研究分布函数随时间的变化。事实上，它们可以被写成如下形式：

$$\begin{aligned}&\int_{k^3}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[\phi(\xi)P^{(1)}(x,\ \xi,\ t)]\mathrm{d}\xi\\&=\int_{k^3}\phi(\xi)G(x,\ \xi,\ t)\mathrm{d}\xi\\&-\int_{k^3}\phi(\xi)L(x,\ \xi,\ t)\mathrm{d}\xi,\end{aligned}\tag{4.12}$$

其中 ϕ 本质上是 ξ 的任意函数，而 G 和 L 如在方程(4.8)中一样是相同的。方程(4.12)是关于 ϕ 因碰撞而产生的平均变化的方程。显然，如果 ϕ 在很大程度上是任意的，则方程(4.12)蕴含了玻尔兹曼方程(4.8)，而麦克斯韦忽略了这一步。

第五章

时间不可逆性与 H 定理

引　言

玻尔兹曼不仅表明，以他的名字命名的方程承认麦克斯韦分布作为其平衡解，而且给出了一种辅助证明：它也是惟一可能的解。为此，他引入了一个先用 E 来表示，但后来(如在这里)用 H 表示的量，这个量由分子的速度分布来定义。他由此证明，作为他的方程的一个推论，这一函数在一孤立系中必然总是减少的，或至多保持不变，而后一种情形仅发生于统计平衡态中。这一结果通常被引用为“H 定理”，表明 H 必须与负熵成正比。

H 基本上被玻尔兹曼定义为 $f\log f$ 关于动能的积分，其中“log”表示自然对数。通过对于他的方程性质的详细考察，他证明 H 对时间的微分绝不会是正的，并且，当且仅当速度分布为麦克斯韦分布时

为零。 由于 H 是从下面(为它的平衡值)约束的，它的减少不能低于这个值，因而只能趋于它，同时 f 将趋于麦克斯韦分布。 确实，这一结果的严格证明远非那么简单。 经过了许多年以后，卡尔曼才给出了玻尔兹曼“H 定理”的一个无懈可击的证明。 而回顾前一章，我们看到玻尔兹曼已借助于离散模型使这一结果在直观上成立。

一个引人注目的事实是，这一证明也能拓展到多原子气体。 确实，玻尔兹曼起初对此所作出的证明并非是完全普遍的，如首先为 H. A. 洛仑兹于 1887 年所指出的；一个为玻尔兹曼“修改后的”、基于“闭合的碰撞循环”的版本，也并没有真正令人满意。 问题的这一方面一度为人们忘记了，一直到运用量子力学的方法，所需的性质才证明为来自量子力学中描述碰撞现象的所谓的散射矩阵(S 矩阵)的幺正性。 在多分子情形中，运用纯经典的方法给不等式的成立以一个令人满意的证明，也只是近年来才得以完成，但它似乎未能引起有关分子运动论的史学家们的关注。 我们在第八章中将再回到这一点上来。

玻尔兹曼对于多原子气体和他的成果的重要性的评论，在其论文一个部分的中间，约全文的三分之一处，但在文章结尾他又回到了这点上来。 气体中的“复杂分子”可以是与其环境相作用的宏观物体，因此，玻尔兹曼认为他已经在纯力学的基础上，证明了热力学第二定律。

H 定理导致了一种奇异的情形，这种情形在科学史上或许是独一无二的：一方面，玻尔兹曼方程被成功地应用于大量的物理现象；而另一方面，玻尔兹曼的观念遭到了来自物理学家和数学家两方面的强烈反对。 这些反对通常被表述为两个佯谬：洛喜密脱佯谬和策梅罗佯谬。 然而，在考察这些反对意见之前，重要的是应指出玻尔兹曼方程在历史上是第一个关于概率在时间中演化的方程。

新的概率理论是非常难以正确理解的。 大多数人(甚至有些数学家)认为它有些不严格、不科学，是近似的，尽管它今天已成为最为基础和有用的数学领域之一。 事实上，大多数人对于概率的应用，都有着与下述这首快乐的小诗相同的看法。 这首诗为丹麦建筑师、

纳粹入侵时抵抗运动的领导人皮特·海因所作，取自他的小册子Grook(这题目听起来比概率还要神秘，大约是讽刺短诗)：

心理的秘示

每当你需要作出决定，
而你却无所凭藉，
解决难题的最好方法，你会发现，
就是抛掷硬币。
不——这并非让概率来决定事情
而你却被动地站在一边发愁；
当硬币尚在空中，
你突然明白自己心中所求。

下面，我们首先通过对玻尔兹曼论证的反对意见和玻尔兹曼回答的说明，来讨论这些佯谬，然后来看看现代对于事情的理解和误解。

洛喜密脱佯谬

玻尔兹曼的 H 定理有着基础的重要性，因为它表明他的方程的基本特征是不可逆性：量 H 在时间中(当气体与它的固体边界没有物质和能量交换时)总是减少的。这一结果似乎与下述事实是冲突的，即构成气体的分子遵循时间可逆的经典力学定律。相应地，在某一时间，给定具有某一分子速度的运动，我们总能想到同一时刻的具有相反速度(和与前面相同的分子位置)的运动；后一状态的反向变化，将与原初状态的向前变化相等。因此，如果 H 在前一情形中减少，它在第二种情形中则应增加，这与玻尔兹曼的 H 定理是相矛盾的。

汤姆孙在一篇很少被引用的短文中，提出了这一佯谬。它首先

发表于1874年，其中包含了不可逆性现代诠释等重要的物理内容，论及不仅是气体，还有更一般的分子构成的系统。汤姆孙注意到

> 一个系统中每个运动粒子运动的瞬间翻转，导致系统的反向运动，其中每个粒子沿着旧的路径，以相同的速度，处于相同的位置。这就是说，从数学上讲，任何一个解当 t 变为 $-t$ 时，仍然保持为方程的一个解。

即使不考虑热力学，人们也会想到从常识看来是悖谬的一些现象。

> 那么，如果宇宙中物体的每个粒子的运动在任何瞬间是准确地逆转的，自然过程此后将总是逆转的。瀑布底部的破裂的泡沫将重新聚集起来，落到水中；其中的热运动将重新集中起它们的能量，把下落的重量往上扔去，重新形成向上的水柱。由固体摩擦所产生，并为热传导、热辐射、带有吸收的辐射等所耗散的热量，将重新回到接触部位，并抵抗先前产生它们的力，反把运动物体反向送回。砾石也将从重建它们所需的材料中恢复成先前参差不齐的模样，并重新聚结为破碎前的山峰上的悬岩。而且，如果生命的物质假说是真的话，生物也将向回生长，具有关于未来的清楚的知识，但却并没有对于过去的记忆，并重新成为未出生的胎儿。

他还评论说："如果没有选择性影响，例如理想的'守护神'来引导单个分子，它们的自由运动和碰撞的平均结果必然是使它们总体上能量分布趋于相等……"换言之，在最终的分析中，之所以观察不到与实际上所观察到的反向的宏观现象，是由于即使在宏观上很小的体积中，也有着极大量的分子存在。

这一佯谬通常被归之于约瑟夫·洛喜密脱，他有四篇关于受到引

力影响的物体系统的热平衡的论文，其第一篇中，简略地提到这一佯谬。他旨在证明，宇宙的热寂(这似乎由热力学第二定律推出)并非不可避免的。他寻求

> 摧毁热力学第二定律的令人恐怖的光轮，这种光轮使它似乎成为一条要摧毁宇宙中所有生物的原理；同时，寻求开辟一个给人以安慰的前景，使人类不再依赖于煤炭或太阳以转换热量为功，而有着取之不尽的可转换的热量供应。

在试图证明(对比于麦克斯韦的断言)引力场中静止的气体的温度依赖于高度的过程中，他注意到在任何系统中，“如果在任何时刻，它的所有部分的速度都被翻转，整个事件过程将被折返。”

我们在第一章和第三章已提到过洛喜密脱。从后面这章中，我们知道他是一位原子论的信奉者，而从前一章，我们知道他是玻尔兹曼的一位好朋友。我们回想起这么一个事实，洛喜密脱曾提议他和玻尔兹曼在维也纳国家剧院排队买票时，应当来磨由硫化晶体做成的球(以用来做实验)。这里，我们还可以加上一条，在一封玻尔兹曼夫人写给玻尔兹曼的信中，我们了解到洛喜密脱曾对她的咖啡壶十分着迷，并且为自己也买了一只。这两位朋友可能一起讨论过这一反对意见。这可以解释为什么尽管洛喜密脱的论证很含糊，玻尔兹曼却能立即掌握其中的关键之处。

他发表了一篇论文，并在其中对他的批评者不吝颂词，因为对 H 定理的怀疑“被精巧地思索了，并且看来对于理解热力学第二定律有着重大的意义”。然后，他以一种非常清晰的方式，陈述了这一佯谬(“洛喜密脱起初的表述看来对于物理学家难以理解，因为它的相当哲学化的形式”)。最后，玻尔兹曼对这佯谬加以彻底的讨论，并以与汤姆孙相似的方式作了总结。

我们注意到，在这篇论文中，玻尔兹曼已清楚地意识到了第二定

律的概率本性：

> 我们必须作下述评述：要证明下述这一点是不可能的，即无论状态的起始分布如何，在一定时间 t_1 之后，球都必然被均匀地混合了。这实际上是概率理论的一个推论，对于状态的任何非均匀分布，无论它多么不可几，但仍然并非绝对不可能的。的确，任何单个均匀分布(它可能产生于某个特殊的初始状态的某段时间之后)的不可几性与单个不均匀分布的不可几性是一样的；就如同彩票游戏中，任何单组五个数字，与1，2，3，4，5这组数字的不可几性相同一样。只是因为均匀分布的数目要远比不均匀分布的数目多得多，状态的分布在时间进程中才会成为均匀的。因此，无论球在开始时的位置和速度怎样，人们都不能证明在长时间后，分布必然会成为均匀的；而只能证明，无穷多的更原始状态，在确定长的时间之后，会趋向均匀分布，而不是非均匀分布。洛喜密脱定理只是告诉了我们那个在一定时间 t_1 之后实际上趋向了不均匀分布的起始状态，但它并没有证明不存在无穷多的起始条件在相同的时间之后，会趋向均匀分布。相反，正是从这个定理本身，可得出由于均匀分布比不均匀分布多到无穷，因此，在一定时间 t_1 之后，趋向均匀分布的状态数目，要远大于趋于非均匀分布的状态数；按洛喜密脱的说法，后者是必须要去挑选出的个体，以在时间 t_1 得出一个不均匀分布。

我们注意到，诸如“有序态”或“均匀性”这一类词汇的使用会引起混乱，因为人们会在不同的描述层次去考虑“秩序”。当谈到其数量的极小值，或谈到通常的有序态，我们绝不要忘记这总是有限制的，这限制由我们所想描述系统的层次来确定。我们将在下下一节对此作进一步的评论。这里，我们想说，如果观察单个分子，则所有状态都会是有序的。这对于那些对其状态尚不完全了解，但我

们仍坚持所有分子的位置和动量的一种概率(从而满足刘维尔定理)的情形，也同样适用。只有当我们转到一种基于单个粒子分布函数的简化了的描述，我们才把许多状态混合进一个单一的状态，才能谈论高度可几的(无序的)状态。在简化了的描述中，这些状态把极大数目的微观态混合在了一起。

彭加勒复现与策梅罗佯谬

另一个对于 H 定理的反对意见，是作为力学定律的严格推论提出的。这一佯谬用的是著名数学家策梅罗的名字，他当时是马克斯·普朗克在柏林理论物理研究所的一位年轻助手。他于 1896 年提出了它，但却并非第一个引入这一论证的人。即使我们忽略哲学家弗里德利希·尼采(1844～1900)的相关表述，事实上他曾提出世界是永久存在的，不会有一个最终的状态(否则这状态应已经达到了)，因此它会无穷多次地重复同一事件，我们也可以发现彭加勒在一篇短文中首次提到过它。

这位著名的法国数学家很关心“诱惑了如此众多杰出学者的宇宙的力学概念”所遇到的障碍。事实上，他说：“一个易于证明的定理告诉我们，一个为力学规律所支配、受到约束的世界，将总是经过一个非常接近于其初始状态的状态。”在注意到与热力学第二定律的矛盾之后，他接着说(显然忽略了玻尔兹曼)：

> 我不知道人们是否注意到，英国的气体运动论者能从这个矛盾中把自己解脱出来。在他们看来，世界起初趋向于一个状态，它将长时间地保持在那儿，没有明显的变化；这是与经验相符的；但它并不永远保持着那种方式，如果上面所引证的定理不被违背的话；它不过是说这是一个极长的时间，这时间越长，分子数目就越多。这一状态并非宇宙最终的热寂，而是一种熟

> 睡，在千百万年之后，它会又从中醒来。按照这一理论，看见热从较冷的物体流向较热的物体无须不着边际地幻想，不必有超人的智能，也不必有麦克斯韦妖的机敏；只需要一点点耐心足矣。

因此，彭加勒反对把一切都还原为原子的运动，或者如先前所引的皮特·海因的诗中所说：

> 原子化的世界
>
> 自然，看来是千百万，千百万，千百万个
> 粒子，玩耍它们无限的
> 台球、台球和台球游戏
> 的通俗的名称。

彭加勒在上文中提到的定理，在他三年前发表的一篇著名的关于三体问题的论文中所提出，他并且在一个特定的为三个一阶微分方程所支配的系统中证明了它。1896 年，策梅罗由彭加勒的这一研究出发，并忽略了后者的那篇较短的论文，对一个有着任何(有限)数目的自由度的系统，给出了一个较短的证明。然后，他把它应用于气体分子运动论，并加上了类似于彭加勒的评论。他的结论是：

> 在任何情况下，基于目前的理论，都不可能对热力学第二定律进行力学推导，而不对初始条件加以限定。有可能无法证明著名的速度分布将会作为最终的稳定状态而被达到，如其发现者麦克斯韦和玻尔兹曼所期望的那样。我并没有详细考察玻尔兹曼和洛仑兹为此证明而作的各种尝试，因为这一论题的困难性，我只有尽可能清楚地说明：什么是可严格证明的，什么看来有着最大的重要性，从而对讨论的更新和问题的最终解决作出了贡献。

策梅罗不必为玻尔兹曼的回答等得太久，这一回答是相当尖锐的。在对洛喜密脱的回答中，玻尔兹曼提到在力学基础上证明热力学第二定律是不成问题的。相反，这条原理的普遍有效性受到质疑，因为分子运动论表明，它的内容并非完全确定的，而不过是高度可几的。随着这段陈述而来的，是一段非常严厉的句子：

> 策梅罗的论文表明，我的论文被误解了；然而使我高兴的是，它似乎第一次表明了我的这些文章在德国竟还是有人注意到了。策梅罗在他的论文开始时说明的彭加勒定理显然是正确的，但当他把它应用于热学理论时，则并不正确。

为玻尔兹曼所强调的主要之点，在于与策梅罗的意见不同(但与上述彭加勒的论文一致)，在足够长时间之后导致平衡态的那些状态占有压倒性的多数。而关于再现的时间，玻尔兹曼认为它必然是极大的。他评论道，对于一立方厘米盒子中的气体的 10^{18} 个粒子来说，再现的时间(以秒计)在十进制中为 10^{18} 的数字，这是一个难以想象的数目(目前估计的以秒计算的宇宙年龄也只有 10^{17})。他继续说：

> 因此，当策梅罗从气体中的初始状态必然再现(但并没有计算它需要多长时间)这一事实出发，得出结论说气体理论的假说必然被拒斥，或是作根本性的改正时，他就像一个玩骰子的人，他计算出一连串 1 000 个一的概率不等于零，于是得出结论，说他的骰子被灌过铅，因为他迄今为止，还没有看到这么一串数字。

随着上面讨论的策梅罗和玻尔兹曼的文章而来的，是相同作者的另外两篇文章，其中他们实质上重复了各自的论证和观点。然而，在他的第二次回答中，在建议人们在应用理论(我们的思维图像)于它被实验检验过的领域之外时必须小心之后，玻尔兹曼指出了关于宇宙

的状态和演化，有着两种替代的表述必须被考虑，以获得一个相一致的观点。这里，有必要把这段文字整个引证如下：

> 人们可在两种图像之间加以选择。人们可以假设整个宇宙发现自己目前正处于一个非常不可几的状态。然而，人们可以设想这个不可几状态所持续的极长时间，以及从这里到天狼星的距离，比起整个宇宙的年龄和尺度来说，都是很微小的。于是，在整体上处于热平衡，因而是热寂的宇宙中，必然或此或彼地存在着像我们的星系(我们称之为世界)大小的相对小的区域，在相对短的时间内，会出现明显违背热平衡的现象。在这些世界中，状态概率的增加，就像它的减少一样频繁。对于作为整体的宇宙而言，这两个方向是不可区分的，正如在空间中，不存在向上和向下之分一样。然而，正如在地球上的某个地方，我们可以称“向下”为朝向地心的方向一样，一个生物当发现自己处于这么一个世界，这么一个时间周期中时，也可以定义时间方向为从较不可几的状态，朝向较可几的状态(前者将称为“过去”，而后者为“将来”)，并且由此定义，他会发现这个与宇宙的其他部分隔绝的小的区域，在“起始时”总是处于一个不可几的状态。在我看来，这个观点是惟一可以理解热力学第二定律的有效性和每一世界的热寂的方式，而无需诉诸于整个宇宙从确定的起点走向最终状态的统一方向。

玻尔兹曼还作出过其他几个重要评论。他从驳斥对于他的热寂宇宙，“马赫式的”观点会有的反对意见出发：

> 对于认为为了说明宇宙中一小部分的生命，而假设其一大部分是热寂的这种做法是不经济的，因而是无用的这种反对意见，我认为是无效的。我非常清楚地记得有这么一个人，他绝对拒

绝相信太阳距地球有两千万英里之遥，因为不可想象如此广大的空间中，充斥的仅是些以太和如此稀少的生命。

在指出放弃统计描述将使我们对自然的理论认识枯竭，并讨论了 H 相对于时间的表现(所谓的 H 曲线；见第六章)后，玻尔兹曼以下述评论作为他本篇论文的结论：

彭加勒定理当然不能应用于我们可以观察到的地面物体，因为这样的物体并非全然孤立的；同样，它也不适用于由气体分子运动论所讨论的完全孤立的气体，如果人们首先让分子数是无穷的，然后又让相继的碰撞和观察时间的时间微商(趋于零)的话。

佯谬的物理解和数学解

谁赢得了这场战斗？ 是策梅罗还是玻尔兹曼？ 物理学家决定追随玻尔兹曼的观点，特别是原子的存在被确定无疑地证明后(在玻尔兹曼自杀两年后)。 而在此之前，阿尔伯特·爱因斯坦运用玻尔兹曼的观念，说明了布朗运动。 而甚至再早些，普朗克不得不用统计概念来说明黑体辐射的光谱(见第十二章)。 到 1930 年，第二定律的统计证明对于所有物理学家来说，已成为不争的事实。

然而，纯粹的数学家不能接受玻尔兹曼的论证。 一个定理可能是真的或假的，但不能是大概真的。 换言之：或者 H 定理是正确的，可以应用于真实的气体，或者它不是一个定理，那样我们还有什么可说？ 因此按照纯数学家们的看法，策梅罗将胜出。

另一方面，这是一个祝捷式的胜利。 玻尔兹曼未能成功地提供一个数学定理，因为他缺乏适合于表达他的想法的数学语言。 顺便说一句，人们评论到，彭加勒和策梅罗也遇到同样的问题，他们的定理并不比尼采的表述严格多少，因为严格表现复现理论所需要的测量

理论，要到 1902 年才为莱贝斯格所建立。然而，这是一个相当有学问的评论，因为证明彭加勒定理所需要的关键性质，是相空间中演化集的体积不变，和有限的数目子集联合起来的体积等于个体的体积之和这一事实。

然而，大约 1950 年，人们开始考虑提出一个非悖谬的定理，即使它将非常难以证明。1949 年，哈诺德·格拉德写了一篇论文，很快就广为人知，因为其中包含了近似地解决玻尔兹曼方程的系统方法。而在同一篇论文中，他对气体分子运动论也作出了基础性的贡献。事实上，他提出了关于玻尔兹曼方程有效性的猜想，使人联想起上一节结尾处所引用的文字和我们在上一章引用过的玻尔兹曼关于气体理论的演讲。用格拉德的话说：

> 从前面的讨论中，有可能看出应沿着什么样的途径进行玻尔兹曼方程的严格推导。首先，我们应当让分子数密度 N 的增加没有约束。同时，我们希望气体的宏观性质是不变的。要做到这点，我们允许 m 以如此的方式趋于零，使得 $mN = \rho$ 是确定的。弹性球的玻尔兹曼方程(2.37)在碰撞项中有一个因子 σ^2/m。如果以下述比率即 σ^2/m 为确定数，来使得 σ 趋于零，那么玻尔兹曼方程保持不变……在这里描述的极限过程中，看来刘维尔方程的解有可能获得许多玻尔兹曼方程的重要性质。

这里，m 为分子的质量，σ 为分子的直径，而 ρ 为气体密度。

在《物理学杂志》上为同一作者所写的文章中，人们读到了相似的句子。玻尔兹曼气体在那里用于描述其动力学产生于上面提到的极限的系统。在更近期一些的文献中，当人们允许(单位体积的)分子数 N 趋于无穷，而分子直径趋于零，从而 $N\sigma^2$ 为有限数时的极限，被称作玻尔兹曼-格拉德极限。这个名称是非常恰当的，因为尽管极限程序的精确表述归功于格拉德，但玻尔兹曼指出了在他脑海里

已有着这一类的东西，如上一节结尾所引文字和前一章中所引他的演讲中所表明的，对此，我们还可以加上下述这些：

> 因此，我们使自己面对这样的问题，即对在外力存在的情况下，对单位体积中无穷多的分子，找出现象的极限规律，然后假设实际现象与这些极限不会有引人注目的违背。

如我们在第 4 章中已评论的，这些陈述偶尔也会令物理学家感到困惑，他们发现奇怪的是，玻尔兹曼明知道分子的尺度尽管很小，但却是有限的；单位体积中的分子数尽管极其多，也还是有穷的，却在谈论单位体积中分子的无限小和数目的无穷多。另一方面，这些陈述也明确表明，玻尔兹曼完全赞成任何统计理论都必须为涨落留出位置，无论它是多么小；只有当我们取适当的极限时，这些涨落才会消失，并引起决定论性的理论。

让我们回到当前的发展。在物理学和信息论发展的影响下，关于熵的观念改变了。还是格拉德，在一篇写于 1961 年的文章中说：

> 人们有时对熵这一名词的不宣而至感到为难的缘由之一，是顶着此名义的东西实在是太多了。一方面，有着大量称为熵的宏观量(状态变量函数)可供选择，而另一方面，一些微观量也有着类似的名称，与概率的对数，或是密度的对数的平均值相关。这些概念中的每一个，都适合于一特殊的目的。然而，比缺乏词汇的想象更为混乱的是这一事实，即这几个在意义和数值上都不同的概念，在一个问题中都是重要的……一个确定的研究对象，不能总是确定一个独特的值，它的“熵”。它可能有着许多不同的熵，每一个都是有价值的。对于它们的适当选择有赖于个人的兴趣、所研究的特定现象、可得到的或任意决定的精确性程度、或是所采用的描述方法；而其中的每一个标准，又很大

程度上取决于个人的决断。这个概念的多产性，很大程度上正是由于它的弹性和意义的多重性。而另一方面，这一问题上的许多混乱，可追溯到这一表面上一致的信念(其根源可能来自神学！)：只存在一个熵。尽管在某些领域，必须论及明确的熵已成惯例，但在另一些领域里，仍然很不情愿去这么做。广泛流传的经典统计力学中存在着悖论的误解，是与吉布斯的名字[见第七章]相联系的，与经典的可逆性-不可逆性二分密切联系的常遇到的困难，也可回溯到这一根源。

人们已经认识到这一观念，在统计理论中，熵描述着某种定性地相关于我们关于系统知识的东西，即关于它的无序的测量。当然，依照描述的层次(这里取决于个人的选择！)，一个事物总是多少是有序的。我们将在下一节再回到这个问题。

科学的优势，在于不仅仅提供新的工具和概念：一方面，实际上实验技巧允许观察高度有序的状态，和系统中非同寻常的大数目粒子的时间反演的可能性，如通过“自旋回波”效应，在其中极大量数目的自由度事实上可以是时间反演的；另一方面，电子计算机的使用，允许对有着极大量自由度的系统进行数字实验。由此，发现了一些不寻常的实验，如从分子动力学的角度，计算 H 的减少，和研究时间反演对于 H 的影响。玻尔兹曼的观念当然得到了确证。量 H 的平均值在减少(由于粒子数的有限，甚至很小，存在着涨落)，系统在几次碰撞之后，达到统计平衡(图 5.1)。然而，如果在 50 次或 100 次碰撞之后，我们反转速度，并关注 H 的演化方程，就会发现一开始它在增加，直到达到其初始值(这对于现代原胞自动机，或是设计来保持时间对称性的数字方案是正确的，但在原初的计算中也不过是近似正确的，由于有反弹误差)，然后开始以一种类似于没有时间反演的情形时的方式减少(图 5.2)。人们由此可看到一种对于热力学第二定律的违背。

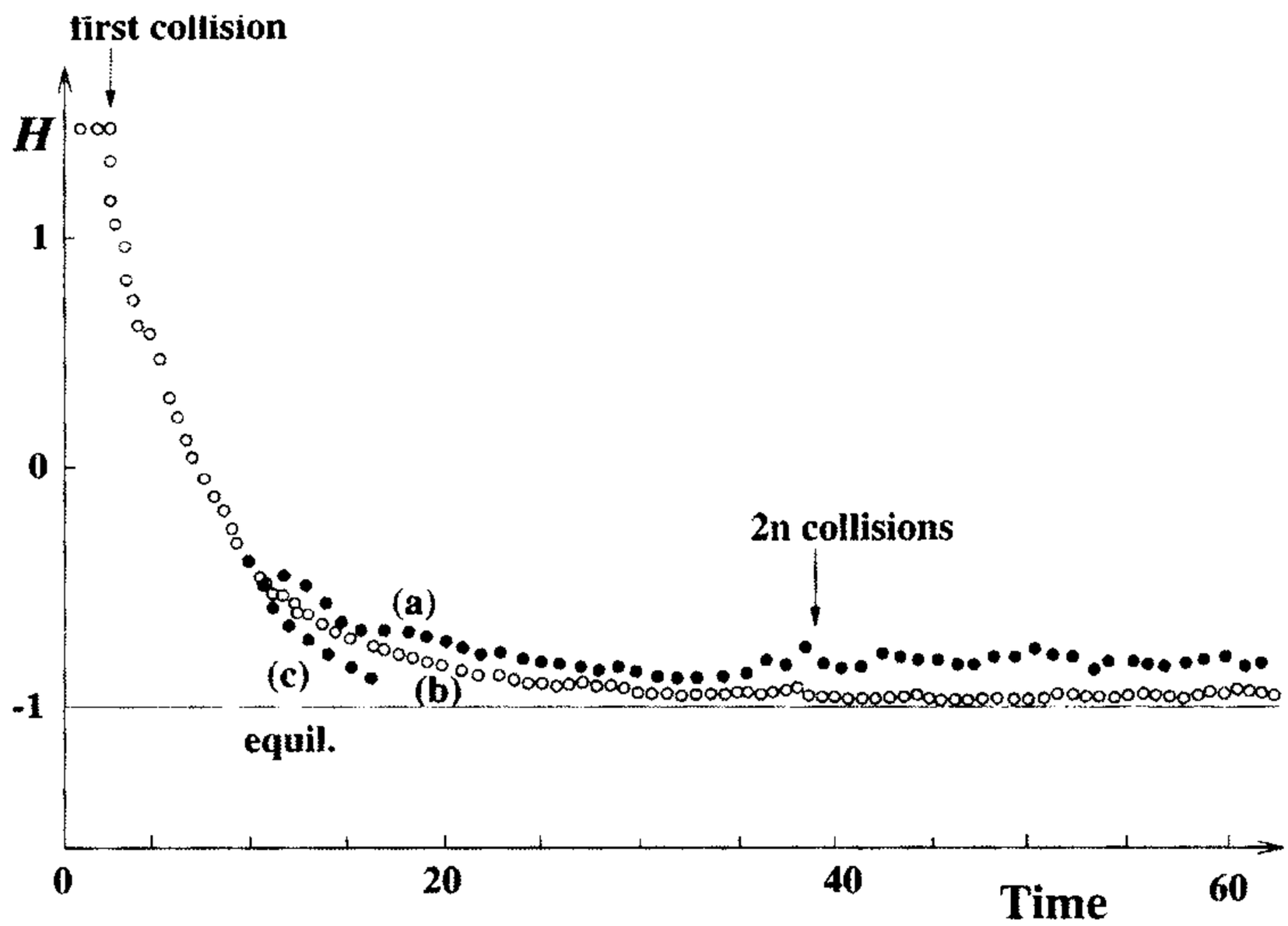


图 5.1　H 在一个计算机实验中的行为。在情形(a)中圆盘总数为 100，在(b)中为 484，而在(c)中为 1 225。（图中英文：分别为第一次碰撞，第二次碰撞，横坐标为时间，纵坐标为 H，equil. 为平衡态）

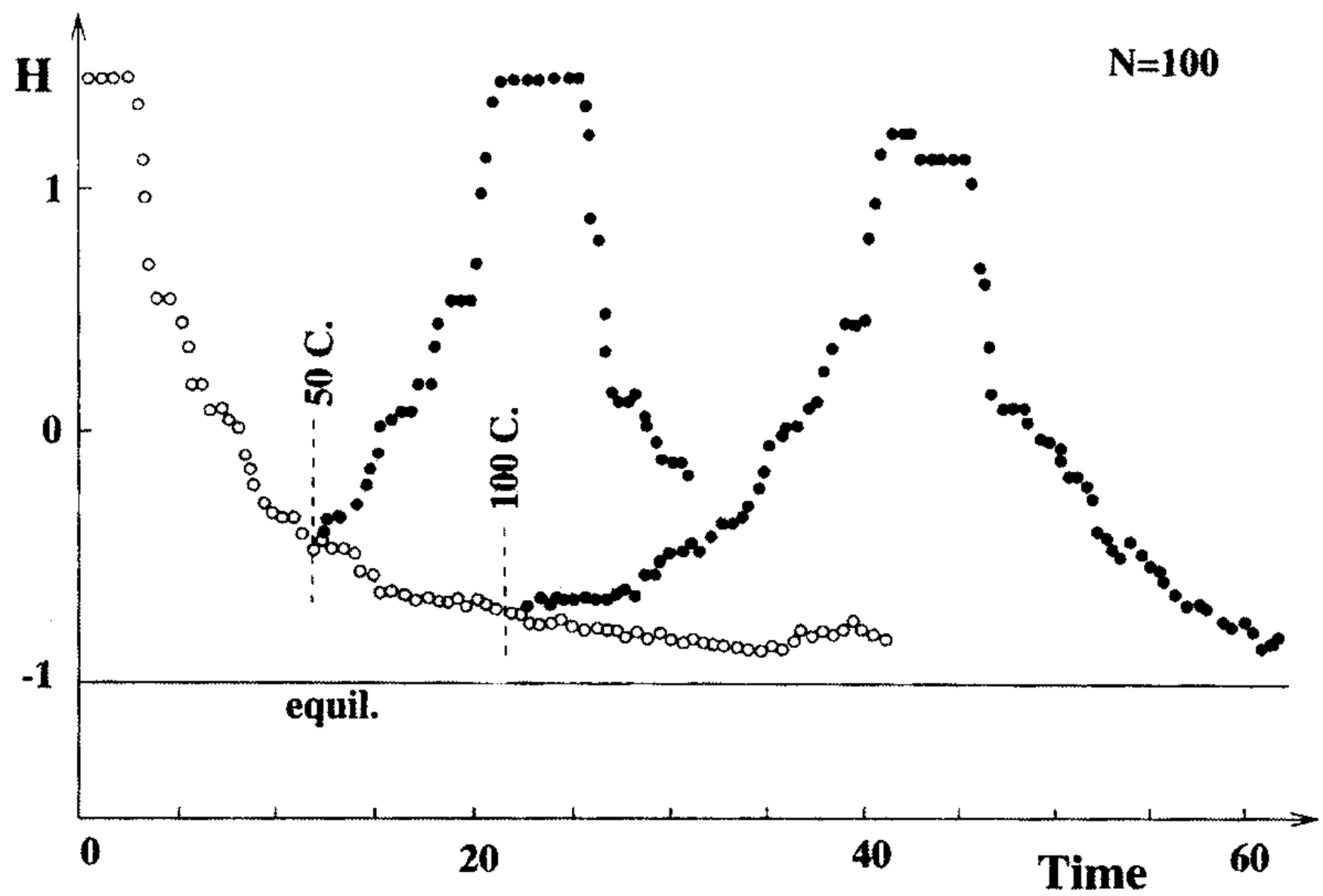


图 5.2　在一个有着 100 个圆盘的系统的计算机实验中，时间反转对于 H 行为的影响。白点对应于由图 5.1 中通过反转速度而得到的初始数据，而两个黑点系列则为在图 5.1 的解中，50 次和 100 次碰撞后反转速度所得。

这种情形不仅不与统计解释相矛盾，而且完全确证了它。玻尔兹曼曾强调他对于分布函数的演变方程的推导不仅依赖于力学定律，而且依赖于初始条件。我们通常观察到的是 H 的减少，而不是其增加这一事实，是与导致 H 增加的初始数据概率较小有关的。然而在这些初始状态中，人们发现当系统从一可能状态变化时，那些由状态的时间反演而获得的状态是可以达到的。自旋回波和数字实验，就是一个假设的“洛喜密脱妖”所可能做的具体实例，这种假设的妖被设想为能反转所有的分子速度。

在 20 世纪 70 年代初，人们已经很清楚应当努力去证明什么样的定理：“如果速度和位置的分布起初是因子化的，即发现有 N 个分子的系统处于对应于位置和速度(x_1，ξ_1；x_2，ξ_2；…，x_N，ξ_N)的状态的概率密度，简单地等于发现第一个分子处于状态(x_1，ξ_1)，第二个分子处于状态(x_2，ξ_2)……第 N 个分子处于状态(x_N，ξ_N)的概率密度的乘积，那么单粒子的分布函数(渐近于 N 趋向于无穷，σ 趋向于零，以此方式 $N\sigma^2$ 保持有限)将是玻尔兹曼方程的一个解；尤其是与之相联系的 H 量在同样的极限中，将是时间的单调递减函数。”

任何试图用严格的数学技巧来证明这一结果的人，立刻会认识到他的任务至少像证明所谓的玻尔兹曼方程的存在定理，即一个保证在 $t=0$ 时给定 f，我们就能在 $t>0$ 时发现 f 的定理一样困难。但是，本书的作者曾经于 1972 年问过自己，如果这一定理是正确的，是否就不可能至少证明它的有效性？其方法是通过假设所有所需的极限事实上在某种意义上存在；它们在某种意义上是足够规则的，可用写出玻尔兹曼方程所需的方式来运算它们；最后，对于我们获得的分布函数的演化方程，当 N 趋于无穷时，惟一性定理有效。这样，他写出了一篇论文，并在其中证实了事情的这一方面。玻尔兹曼方程的证明问题从根本上还原为证明某些极限存在和某些方程的解的存在或惟一性问题。还原当然是一个非常不恰当的动词，尤其是当考虑到任何人

要想再向前进一步所面对的困难，这一步迄今为止也未能完成。

然而，O.E.兰福德看出，有一步即刻可以达到。事实上，他证明了非形式的证明可以成为严格的证明，只要人们限制自己于足够短的时间间隔。从宏观的尺度来看，这确实是很短的，因为它是任何确定的分子相继两次碰撞之间的平均时间的五分之一，但从概念的角度看，这已经相当充分了，因为约20%的分子在此时间间隔中已经碰撞。感谢兰福德的工作，玻尔兹曼方程最终成为一条定理，尽管它只是对一个短时间间隔得到证明！物理学家们是对的，而按照他们的看法，要具有一条定理的力量，就要取极限 $N\to\infty$。

当时间长于兰福德的临界时间时，情况又会如何呢？非形式推导没有任何与时间间隔的长度相关的困难；这一限制不如说来自需要证明数学对象的存在，人们总是取它们存在于任意长的时间间隔中的。

玻尔兹曼方程的严格证明起始于1933年托尔斯滕·卡尔曼的论文，他对于所谓的空间均匀情形中的硬球气体，证明了全局存在和惟一性定理。这一定理的证明有一限制性假设，即初始数据仅通过其数值而依赖于分子速度。这一限制在同一作者以后出版的书中被取消了。

D.莫根施特恩推广了存在定理，证明了空间均匀情形下麦克斯韦分子气体的全局存在定理。他的工作为L.阿尔克伊德于1972年进一步推广。

格拉德发现的重要分析方法多年之后，为日本科学家的工作所臻于完善。

当证明玻尔兹曼方程为严格的定理问题，与玻尔兹曼方程的严格的、整体有效性证明之间的关系清楚之后，对于前者的证明又获得了新的动力。

在卡尔曼、莫根施特恩和阿尔克伊德的成果涉及的情形中，玻尔兹曼方程的解不依赖于空间坐标，因此这些成果不适宜于应用于玻尔

兹曼方程的有效性问题(因为对有限 N 产生的空间相关性在空间均匀性情形也相同)。而赖因哈德·伊尔纳和已故的马尔文·希伯诺特对于一个足够稀薄的气体扩展到真空中的情形，证明了玻尔兹曼方程的全局存在定理，即在任意长时间情形中方程成立。当马尔文·希伯诺特于 1983 年 10 月向本书作者说明这一成果时，本人向他指出，通过适当的调整并与兰福德的论证相结合，同样的技巧应当也可应用于同样的物理情形和任意长时间的玻尔兹曼方程。

详细的证明为赖因哈德·伊尔纳和马里奥·普尔维伦蒂于相继的两篇论文中作出。

那么，此理论的完善还有什么欠缺呢？这就是兰福德考虑过的那种在一个盒子的气体，而对时间间隔不加任何限制。我们的希望再一次有赖于玻尔兹曼方程的存在和惟一性定理。几年以前，已故的罗纳德·迪普纳和皮埃尔-路易斯·莱昂提出了一个独创性的玻尔兹曼方程的存在证明。1994 年 8 月 4 日，莱昂被授予费尔兹奖(用加拿大数学家费尔兹的名字命名，他首次提出设立此奖项，以作为没有诺贝尔数学奖的替代)，而他关于玻尔兹曼方程的工作被评奖委员会突出强调为选择他的理由。迪普纳-莱昂证明的某些细节，加上他们的存在定理证明并未伴之以惟一性定理这一事实，使得应用类似的观念于玻尔兹曼方程的有效性问题仍然至少是有疑问的。

借助于今天已有的数学工作，我们可以更好地来讨论上一节表述的佯谬。事实上，注意到当给出玻尔兹曼方程的证明时，人们使用了弹性碰撞定律和碰撞时概率密度的连续性，用对应于碰撞前状态的分布函数，来表示对应于碰撞后状态的分布函数，而不是相反，即用碰撞后的来表示碰撞前的。显然，前一种方式是人们应当遵从的，如果这方程是用以从过去预言未来，而不是相反的话。然而，显然这一选择引入了一种与过去和未来的日常概念的关联，它与分子动力学无关，却基于我们的宏观经验。当我们取玻尔兹曼-格拉德极限，我们得到的是描述气体分子的统计行为的方程：我们的选择的一个惊

人结论是玻尔兹曼方程描述了 H 有增加趋势的运动，而相反的选择导出的方程中碰撞项前有一个负号，因此只描述带有 H 的增加的运动。我们必须注意，为推导玻尔兹曼方程，人们取的是特殊的(尽管是很可能的)初始数据；因此有些数据被排除了。如前所述，这些排除了的数据对应于这样的状态，在其中那些将要碰撞的分子的分子速度表现出不寻常的相关性。

鉴于我们只在玻尔兹曼-格拉德极限中考虑玻尔兹曼方程的有效性，我们也就无需为复现佯谬而烦恼。事实上，当 $N\to\infty$，而复现的时间随着 N(并以比 N 自身更快的速率)而趋于无穷，彭加勒定理对于系统的这组可能的状态也不再适用。关于这一点的进一步讨论，必然会把我们引向讨论时间箭头问题及其与宇宙膨胀的联系。在下一节讨论这一问题之前，我们应先来讨论对于玻尔兹曼工作的一个现代的反对意见。

事实上，人们可能反对说，今天的原子已不再是如玻尔兹曼所曾考虑过的原子。对于这一点的完备讨论显然不那么容易，无论是就其相关方面还是无关方面。但玻尔兹曼自己是意识到原子概念，乃至于整个理论物理学结构的演进的。他的观点在下述引文中得到很好的表述(1899 年)：

> 旧的力学理论，即使在剥去其中的形而上学之后，是将能保持其基本特征而继续存在，还是到某一天将只存在于历史中，而为一些非常不同的理论所取代？目前的分子理论，无论作什么样的添加和修改，其基本特性将仍能继续生存，还是未来某天的原子理论将有着与今天全然不同的形式？或是与我的证明相反，有一天会发现一个纯连续的概念提供了最好的图像？……这确实是些有趣的问题！人们止不住要懊悔，在这些问题见出分晓很久之前就不得不死去。我们的终有一死是多么地不合理！乐于观看争论中的波动起伏是我们真正的命运。

这是一个根本性的评论。为使它听起来不那么悲伤，我愿再次引用皮特·海恩的诗句：

我希望——
我希望知道
这整个的一切表明
的究竟是什么
在它终结之前。

这一段引文说明了什么？如玻尔兹曼所指出，我们的理论绝不是世界的最终图像；我们或许一层接着一层地发现了实在的不同层次，而一种关于物质是连续的还是分立的基本的哲学观点可能是正确的，也可能是错误的，甚至会是没有意义的，这取决于哪一种理论最好地概括了我们挖掘到某一深度时的成果。这种非教条的观点，在玻尔兹曼关于气体理论的演讲中也表现出来：

> 由于科学史表明，认识论的概括经常被证明为是错误的，它难道不会证明目前对于特殊表象的“现代的”厌恶，以及对于不同性质的能量形式的区分，将是一种倒退吗？谁能预见未来？让我们对所有的发展方向取一种自由的眼界；抛弃所有的教条，不管是原子论的还是反原子论的！在把气体理论描述为力学理论的类似中，我们已经指出，通过选择这一词汇，我们已经很远地偏离了从可见物质来看，物体最小粒子的真正性质是什么。

然而，看来玻尔兹曼的确把握了重要的特性，它将在不同深度，以这种或那种方式再现出来。不可逆性在即使基本定律是可逆时也会出现；初始数据和概率也是重要的。确实，未来可能为我们准备着惊奇，例如热力学第二定律与量子力学中的波包塌缩之间会有联

系，这已为罗杰·彭罗斯所充分讨论。科学的本性就是要猜想和提出新的观点，但在一种卓越的观念得以仔细地检验之前，人们不应急于去赞同它。

时间箭头与膨胀宇宙

时间不可逆性与热力学第二定律之间的联系，由于英国著名的天文学家阿瑟·爱丁顿爵士 1934 年在康奈尔大学的信使演讲而广为人知。在向自己发问“是否在物理宇宙中的每个地方和每时每刻都有着一个路标，上面一头写着‘朝向未来’，一头写着‘朝向过去’”之后，他的结论是这个路标，这个告诉我们时间方向的箭头，是由熵提供的，是建立在热力学第二定律基础上的。爱丁顿(但是，如我们所见，不是玻尔兹曼)似乎对即使是统计处理也能确定时间箭头这一事实并无疑问。那么我们刚刚说到的数学处理都能告诉我们些什么呢?

初看起来，它们似乎会确认这一箭头的存在，这一箭头指向熵值的增加，给出了时间轴的方向。但更仔细的考察表明，从某种观点看来，这是一种幻觉。事实上，如果我们对分子运动的研究不是从时间增加的某一瞬间开始，而是从减少时间开始，我们会得出熵值随着时间变量值的减少而增加！换言之，如我们已知道的，动力学方程不能够提供沿时间轴上的两个方向之间的区分。如果它们确实能这么做，我们就会有逻辑上的悖论，因为这些方程自身完全是可逆的。而且并非以一种统计的方式来处理问题，即通过忽略部分关于我们的气体的信息，就可使方程向我们显示时间的方向，否则则不行。因此，我们的结论是：已被证明的定理仅向我们表明，对于我们的气体，如果初始数据并非处于不可能的集合，则熵将随着 t 的增加或减少而增加。使这一结果与经验相协调的一种途径，是说：“好吧！就定义为时间增加的方向就足够了，熵在其中也增加。”如我们前面所见，这也多少是玻尔兹曼的提议。如果在宇宙中只有

一个充满空气的盒子，这将是令人满意的；这会是一个很小而又烦人的宇宙。我们的宇宙则要远比这复杂得多，忽略掉其他许多东西，我们不得不承认至少有着不止一个充满气体的盒子，其中有些表明熵随着时间增加而增加，另一些则随着时间的减少而增加(相对于任意朝向的轴)。在20世纪哲学家的术语中，这些子系统称为“分支”系统。按照这一术语，不可能改变时间轴的方向，因此对分支系统熵是增加的。一个需要说明的问题是为什么这些分支系统如经验所示，在表现时间箭头上是一致的。那么为什么呢？人们必须承认，实际上这些系统并非孤立的，而是与宇宙中的其他部分相耦合的，由此即使当一个系统被说成是孤立的，它实际上也必须能交换(或在过去已交换了)很小数量的能量，例如以电磁辐射或引力辐射的形式。于是熵的增加只能适用于整个宇宙(假定它为动力学系统所描述，并得出类似于对经典气体中所得出的结论)，或是其中足够孤立的部分(如前面所引的玻尔兹曼对于策梅罗的第二个回答中所指出的)；但现在，时间箭头对所有部分都是相同的。实际上，由于仅能通过辐射交换能量的物体相距十分遥远，我们注意到辐射更倾向于离开，而不是到达(奥伯斯佯谬)，宇宙与充满气体的盒子十分不同，它看来并不反射辐射。这一点与下述事实相关，就是宇宙正在膨胀，物质之间以极快的速度彼此飞离。但即使是(不为玻尔兹曼所知的)膨胀现象，也有助于阐明时间的特权方向，而且在最终的分析中，这也正是真实的时间方向。关于这一点，托马斯·戈尔德首先作了清楚的阐述。

这样，宇宙的说明就内在地与所有直到微小维度的物理过程相关联，有一天，对于物理定律的深刻理解会允许我们从观察到的非常小尺度的现象中，演绎出宇宙的膨胀。

宇宙看来是在膨胀，而不是在收缩。这是否意味着在两个可能的运动方向中，自然已选择了其中之一？当然不是。如果自然规律不是对于时间反演对称的，这或许是正确的：于是一个膨胀中的宇宙可区别于收缩的宇宙，而我们的宇宙将属于前一类型。我们于是可

以问自己，为什么我们不在另一类型的宇宙中。然而情形并非如此，惟一的时间箭头(在宏观层次上)正是由这种膨胀提供的。自然，说到物理规律总是比它们所应用之的宇宙更对称，这种观念并不新鲜。尽管按照伽利略和牛顿的力学，同样也按照爱因斯坦的狭义相对论，所有的惯性系是等价的，但人们总是能找到一个特权参考系，它由下述事实来确定：观察者在其中能看到关于他的宇宙各向同性的膨胀。而温度也已成为大多数现代基本粒子理论的线索。

因此，物理规律将给我们两个宇宙，一个相关于时间而对称于另一个。没有办法来说明为什么我们发现自己处在这一个中，而不是另一个，因为它们是不可区分的。如戈尔德所评论的，同样的推理可应用于物质和反物质之间的对称：一个反物质的世界是无法与物质的世界相区分的。当他写下这一评论时，物质和反物质之间的对称的违背还未被发现，只有对称和时间对称的结合被证实了。从概念上讲，这是更为令人满意的，因为只可能有两个宇宙：它们的不同在于物质和反物质，和时间的方向，但它们是不可区分的。物理规律的对称性，正是为描述单一可观察宇宙所需要的东西。

在此，我们不可避免地会问自己，为什么我们主观上如此确定时间“确实是走”这一方向，而不是另一方向。借助于关于时间反演对称的物理规律，我们终究应能像从关于过去的知识来预言现在一样，能从关于未来的知识来预言现在。那么为什么过去和未来对我们是如此的不同呢？为什么我们不用物理学规律来思考关于过去的演化，而总是想着未来的变化？为什么我们认为关于过去的信息都已被完全确定了，而如一位匿名的文艺复兴时期的诗人，或许是了不起的洛伦佐所说，“未来并不掌握确定性”？为什么我们认定系统今天的状态是它明天状态的原因，而不是它昨天状态的原因？从对于复杂系统(例如气体)的研究，我们只能得出结论说，我们是在宏观层次上，以极大的精确性来预言未来。而预言过去，就像由一个骰子现在在桌上的那点和显示的 6 点那一面，来预言当它被掷

出时，它处在哪个位置。而我们自己是时间取向的：是甚至更为复杂的系统，复杂到对我们而言，这种在缺乏相关数据的详细信息下，而作出的对于未来的纯统计性质的预言，其精确性可以说已达到了绝对确实的程度，只要我们同样乐于接受这种预言结果中细节的缺乏。

同样注意到，可逆的（关于时间反转）一词在数学文献中有着含义。关于这一点的详细讨论可见 R. 伊尔纳和 H. 纽泽特的论文。

这里，对一个经常出现，甚至在非常新近的书籍中还出现的说法作出评论，或许并非是不合适的。这一说法针对的是没有一种不可逆性能为保守系的分析力学的正确数学所描述，因此分子运动论中的某些假设必然与分析力学相矛盾。应当明确的是并非引入了新的假设，事实是我们在玻尔兹曼-格拉德极限下，来研究一个保守系统的不对称性质。

实际上，即使不使用计算机，仍有一些模型可用来澄清悖论的性质和熵增的数学意义。或许最简单的是一个沙漏模型。从力学的观点看，沙漏是相当复杂的，但我们可给出其工作方式的一个简化描述，通过忽略沙粒的能量、动量等，而把注意力仅集中于这仪器两个球其中一个里的沙粒数量。沙漏的世界有一个开端和一个结束：开端就是当把它放到桌面上时，而结束是当所有的沙粒都掉到下面这个球中时。通常，在开端时所有沙粒都在上面这个球中，但我们也可以想象不同的起始条件。某人把沙漏倒了个个儿，而且改变这两个球的位置如此迅速，使得在此操作过程中，没有沙粒通过分隔这两个球的小孔，从而完成了一次时间反转操作，而所考虑的这个“小宇宙”可处于任何状态，这样洛喜密脱佯谬就在我们面前产生了。显然，策梅罗佯谬在这个模型中并不表现出来，同样也不会有涨落。所以我们的模型只告诉了我们一半的故事，但的确是很有启发性的；尤其是我们的结论将不同于书中上面所引，而与本节和前面所讨论的玻尔兹曼的论证一致。

不可逆性：客观的或主观的？

时间箭头，是一个为神秘气氛笼罩着的话题，通过关于时间旅行的可能性一类的科学幻想，它已经被通俗化了。这一概念之所以能获得科学崇敬的辉光，要归功于库尔特·哥德尔的一篇文章。不仅如狭义相对论的推论那样，可以去未来旅行，而且回到过去旅行在理论上也是可能的。这一充满刺激性的观点的基础，是由哥德尔的发现提供的，这一发现给出了广义相对论场方程的某些解，在这些解所描述的世界中，存在着封闭的因果链条。哥德尔自己说过："……通过坐在火箭上的来回旅行，有可能在这些世界中旅行到过去、现在和未来的任何区域，然后再回来，就像在其他世界中，到空间中的遥远部分去旅行一样。"

关于过去和未来的时间不对称性，哲学上也有着大量的文献。如我们前面所强调的，在经典力学方程中，时间的两个方向之间并无内在的不同，但这与玻尔兹曼的结果并不矛盾。

本节内容主要是哲学味儿的。因此，它或许应被放在第十章中，那一章讨论玻尔兹曼的哲学观点。事实是玻尔兹曼自己从不去写出人们从他的 H 定理、或更一般地，从不可逆过程的概率解释中能得出的令人瞩目的哲学推论。但这一话题却极大地刺激了 20 世纪的哲学家们。尽管玻尔兹曼已经作出了许多努力，来澄清他对不可逆性的看法，但必须承认，他未能成功地把大多数哲学家和科学家引导到真正的热力学中时间不对称性问题上来。玻尔兹曼把这个问题等同于说明为什么宇宙的熵比之于它的平衡态的值，在过去会如此之低，而且仍然如此之低。这是一个典型的宇宙学问题。

实际上，H 定理和玻尔兹曼方程自身的获得，不过是以限制初始值为代价的。为什么这些初始值适合于计算未来，而不是过去，其说明的代价是引入人类学论证，它可能不同于我们关于过去和未来的

观念，听上去像是对于我们处理宏观仪器的方式，假设了我们需要证明的不可逆性。

对于不可逆性问题最早、也是最精确的哲学论述之一，是汉斯·赖兴巴赫的论述。他从给出时间不对称问题的明确定义开始，首先考虑一根线上的对称秩序：

> 当我们说一根线尽管连续有序，但却没有方向，我们的意思是无法从结构上在左右之间作出区别，在这一关系和它的逆关系中作出区别。为了说出哪一个方向我们愿称之为“左”，我们必须指向一个图；或是命名一些点，然后用名字来指出所选的方向。如果我们决定称我们称为“左”的为“右”，或是相反，我们不会看到有任何结构上的不同；就是说关系“在左边”与关系“在右面”有着相同的结构性质。

在注意到在从负到正的实数连续统中，情形不再如此，即乘积带来了变化(两个正数的积是正的，而两个负数的积也是正的)后，赖兴巴赫继续说：

> 应用这些结果于时间问题，我们发现时间通常被设想为不仅有秩序，而且有方向。关系“早于”被看作与关系“小于”同类，并且不像“在左边”那样没有方向。这意味着我们相信关系“早于”在结构上不同于它的反面，关系“晚于”。

他后来定义“未来”为大多数几乎孤立的(“分支”)系统的熵增的时间方向，并论证如下：

> 设想我们在沙地上发现脚印，它已为风吹平了些，但仍然可以辨认出是人的脚印。我们从这一“记录”中得出结论：稍早

一些曾有一个人在沙地上散步，因而产生了这些脚印。这一推理的逻辑构架是什么？

运用简单的规则，不同的沙粒排列可以分类……假设所有的排列有同等可能是不正确的……脚印给出的状态是高度有序的状态，而平滑的表面则是无序的状态……我们要问，我们应如何说明这有序状态的出现呢？

答案是……我们假设观察到的状态为相互作用的结果，我们宁愿这么一种相互作用，系统以前在其中不是孤立的。至于热力学统计，这种干扰基于一种多系统概率，以对比于单系统概率。

于是，赖兴巴赫在这一问题与哲学的基本问题之一——因果性之间建立起联系。我们注意到，尽管原因和结果概念在日常生活中是非常普通地使用的，它们在科学中却变成神秘的，因为迄今已经熟悉的事实：基本定律是时间对称的。在物理学中（至少在经典物理学中），如果现象 B 不可避免地追随另一现象 A，严格地说，我们不能说 A 导致了 B；其实，我们也可能说 B 导致了 A，如给定在过去和未来之间不存在客观的区别这一事实的话。不可逆现象重新引进了时间秩序，但依照玻尔兹曼，这不过是一种基于概率论证的宏观特性。

让我们回到赖兴巴赫，他说：

脚印这个例子也能帮助我们来分析因果说明的含义。当我们遇到孤立系统表现出在其历史上非常不可能的有序状态时，就需要用因果来说明。于是，我们假设这个系统在早些时候并非孤立的：把目前出现的秩序说明为先前的相互作用的结果。否则会是不可能的事件由此而成为可能的。……我们得到下列用原因和结果来表达的说明：原因是为一个表现出秩序的孤立系统在较近一端经历的相互作用，而有序状态则是结果。

……其实，原因概念据推测起源于经验探索，当人们遭遇到未

曾预料到的宏观有序状态，刺激他的想象力以追寻过去的原因……

因此，对不寻常有序事件的说明，需要把秩序还原为相互作用。这里，赖兴巴赫注意到了与熵概念的联系：

> 在所有分支系统中，熵都在同一个方向上增加，这是一个事实。由于这一经验上的原因，通过熵增来定义正的时间这一惯例，与认可因果性作为一般的说明方法是密不可分的。……如果有人争辩说选择熵增方向为时间方向不过是个惯例问题，他的观念不能说是错的。但他绝不应去犯经常与约定主义相联系的这一错误：忽略了与这一惯例相联系的经验内容。

为什么我们知道过去而不是未来？赖兴巴赫的回答是："尽管过去可以被记录下来，但未来却不能，这一陈述可以被转译为一个统计陈述：孤立的有序状态总是后相互作用的状态，而绝不会是前相互作用状态。"

赖兴巴赫同时注意到，当空间中不同点上的两个事件之间的相关性不能为直接的因果关系所说明，这证明这些事件是与第三个事件，它们的"共同原因"，在共同的过去相关的。这一明显不对称的结构通常称为"分叉不对称性"。其实，这三个事件是嵌在为物理学定律所决定的 V 型事件链中，而无需嵌在一个 Λ 型的模式中(在这一图形中，时间显然是向上运行的)。这样，总有着一个独特的先行事件(位于 V 型图的顶点上)，但无需一个独特的后续事件(位于 Λ 型图的顶点上)。因此，两瓶饮料即使从未在同一时间处于同一地点，也可以是不可区分的。它们的共同"原因"是生产它们的工厂，或更遥远些，是它们的外形、标签和瓶盖的共同的设计者。

赖兴巴赫的非常独创性的思想路线遭到了来自其他作者的挑战。马基主张我们从因果性中提取出不可逆性，而不是相反。厄尔曼宣

称知识不对称性出于因果不对称性，而这与熵没什么关系。冯·赖特论证说因果性的时间取向起源于我们对于未来的操纵能力。而萨尔蒙则提出说明应当被定义为对原因的阐明。

在霍里奇看来，在时间不对称性现象的起源上的这种惊人的不一致，以及它们之间的彼此依赖，是由于无法正确评价和满足综合性表述的需要。霍里奇自己试图通过思考一个更为广泛的概念框架，以避免这一缺陷。他的理论是时间自身没有内在的方向性或不对称性。相关于熵而言，他的说明部分是与本章中给出的论证一致，也与赖兴巴赫一致的。但尽管捍卫了赖兴巴赫的观点以反对厄尔曼的批评，霍里奇却不同意他把我们关于未来的概念还原为某种熵的关系。霍里奇也不赞同马基和冯·赖特的批评。他强调了所有不对称性都依赖于一个独特的物理事实，即“分叉不对称性”，它首先由赖兴巴赫所提出，并为萨尔蒙所阐明。他也推测过什么样的宇宙学条件可以说明它(热力学，从有序到无序的自发的趋向，膨胀宇宙)，但如他所说，这实际上是物理学的事。他的论述适合于如上节所述的任何给分叉不对称性以独特起源的物理学理论。

我们必须强调，我们所引的赖兴巴赫以及其他哲学家的论述，基本是与本章所述一致的，假设我们限于宏观世界，并不试图把这些论述用于只有几个分子的系统的话。

我们也必须讨论一些为哲学家所提出的概念。如果在某种语境中恰当理解的话，这些概念可能是有价值的，但用于科学说明之中，它们是错误的，或至少是没用的。不幸的是，这些观念中有些已渗透进了科学界。尤其危险的是，由于面向广大读者的书籍和报刊文章所取得的成功，已使得许多人相信这些错误的观念是玻尔兹曼理论的欠缺，而且已经发现了新的观点来纠正这些欠缺。

这里，我们将略过对柏格森关于时间观点的讨论，这些观点迄今(在DNA被发现之后！)仍经常被引证，使人认为生命和物质是两个对立的概念，因为第二个概念能为理性所理解，而第一个概念(据说是)只能为

直觉所理解。这些观点如果仅用于生命体对个人的感受倒无所谓，但却全然不适当地出现在旨在说明科学观念的书籍中。

现在，让我们转向波普尔对于玻尔兹曼由熵增来定义时间箭头的观念所作的批评。他或许是被像海森伯和玻恩这样的科学家的论述所误导了，而这些论述如果正确地去解释的话，原本是正确的。海森伯忽略了玻尔兹曼，说：

> 吉布斯首先引入了一个物理概念，这一概念只能在我们对一个对象的知识不完备时，应用于这一对象。例如，如果已知气体中每个分子的运动和位置，那么继续谈论气体的温度就是毫无意义的。

玻恩写道："不可逆性由此是明确地把无知引进基本定律的推论。"这样，读到波普尔的下述语句也就不奇怪了：

> 显然，相信如下说法是荒唐的：硬币的落下和分子的碰撞之所以以一种随机的方式，是由于我们不知道初始条件，如果有某个精灵把它们的秘密泄露给我们，情况就会不同了。这绝不仅仅是不可能的，用主观的无知来说明客观的统计频率是荒唐的。

然而，令人吃惊的是，在随后的文章中，他所给出的所谓"不可逆过程的客观的概率说明"与玻尔兹曼的也并无多大不同。在另一本书中，他在说到"对于决定论者来说，统计序列的奇怪的类规律行为，依然基本上是不可还原的和不可说明的"之后，他发明了一个非常含糊的词"倾向性"来解释概率。把这些段落从上下文中抽取出来，可能是不公平的，但这就是一个科学家在读哲学文本时获得的印象。或许这是一个语言问题，但那就要仔细说明。

如我们在第十章中会看到的，波普尔很赞赏玻尔兹曼的哲学，但对他关于时间箭头的解释却持严厉批评的态度，并斥之为"唯心主义

者的”。实际上，很大的涨落这一观念是可以批评的，但玻尔兹曼别无选择。广义相对论还未曾发现，关于宇宙学的观念还是非常初步的。然而，波普尔并没有如此提出批评，相反，他说：

> 玻尔兹曼的观念的大胆和优美是惊人的。但是，我也认为它是完全站不住脚的，至少对一个实在论者来说。它把单向变化看作是一种错觉。这使得广岛的灾难成为一种错觉。由此我们的世界成为一种错觉，我们的发现更多有关世界的知识的努力也随之成为错觉。因此，它是自挖墙脚的(像所有的唯心主义一样)。玻尔兹曼的唯心主义特设性假说与他自己的实在论的和几乎是热情坚持的反唯心主义哲学是相冲突的，与他的求知热情是相冲突的。

这里，看来有一个(并非不寻常的)唯心主义与人类中心论之间的混淆。其实，这是一个非常重要的方面：我们必须在自然规律和我们的说话和感觉方式之间作出区分。后一种完全是应当尊重的，可接受的和可辩护的，只要它不是用于科学论证之中。这样，当一个天文学家说：“明天，太阳将在早上6时23分升起”，没有人会认为他是托勒密体系的支持者。这是一种可以用科学术语来严谨表示的缩略语句。当我们谈到感觉和历史事件，事情甚至会变得更为复杂。其实，科学哲学的一个重要目标，应当是使我们的由日常生活而产生的直觉看法，与科学家的客观发现相协调，而事实上从科学规律的角度看，我们通常的看法常常是“错觉”。在澄清物理学时间与日常生活中的时间(它多少接近于热力学时间，却并非力学时间)之间的区别上，玻尔兹曼迈出了一大步。像所有伟大的说明一样，玻尔兹曼的贡献把问题转变为对于其他某种东西的说明，但他在我们对于不同的时间概念的理解上，确实取得了巨大的进步。

波普尔的另一点批评，表现出他对于统计力学的浅薄理解：事实上，他说过布朗运动对于热力学第二定律是一个严重的问题。这

种说法是非常奇怪的，尤其是时至1958年，在麦克斯韦作出下述论述80年之后：

> 因此，在任何属于真实物体的足够小的分子群中，在相当的程度上，热力学第二定律被持续地违背着。随着分子群中分子数目的增加，这种对于整体的平均值的偏离愈来愈小，次数也愈来愈少；而当分子数增加到把物体的可感觉部分也包括在内时，在数量有限的时间内，偏离平均值的可测量变化的发生概率之小，实际上可看作是不可能的。

然而，P.K.费耶阿本德甚至比波普尔走得更远。在他的通俗著作《反对方法》中，他用单个分子发明了一种永动机，说明布朗运动表明第二定律是错的。这一点当然从麦克斯韦和玻尔兹曼起就是已知的，如果第二定律被用于原子，而不是宏观对象的话。

本节前面的讨论与布里克蒙特近来的一篇文章有几点联系，这篇文章尤其是旨在澄清通俗文献中涉及混沌、决定论、时间箭头、熵和物理学中概率的作用等几个问题。这篇文章被推荐为对于近来关于不可逆性的若干观点的详细研究和批评，这些观点出现在上面引用的两本书中。随着这篇文章而来的，是两篇较短的文章，其中一篇是普利高津的反驳，而另一篇是布里克蒙特的回答。问题的主要方面被归结为术语问题。我们已经指出，对不可逆性有着几种可能的定义。尤其是对于常见的、日常的不可逆性，有两个要素是必需的：极大量的微小对象(原子或分子)和适当的初始条件。在相互作用所起的作用上，可能有着混淆。分子间力可能增进，也可能减少不可逆性的趋向，这有赖于它们主要是排斥的(在气体中)，还是吸引的(在固体中)。正如布里克蒙特所指出的，普利高津借助于他才华横溢的文采，所写出的文章在哲学家和外行们(不幸的是也包括一些科学家)听起来是很有诱惑力的，但却令真正内行的科学家们感到困

惑：或者你认真地按字面意思去理解他的论述，结果发现它们是错误的；或者它们被适当地重新解释，结果是它们以一种混乱的方式在表达标准的观念。

结 束 语

本节所包含的是作者观点的总结。在本章中，它已经与其他观点混合在一起出现过。

看来很清楚，玻尔兹曼有能力以数学形式把握热力学第二定律的实质。麦克斯韦已经用物理学的语言预见到了这种本质，但却没能用方程的形式把它表达出来。或许他认为这是不可能的。是玻尔兹曼获取了这份不朽的荣耀，发现了麦克斯韦所留下的未竟事业，并把他的毕生奉献于发展这一思想，诠释他的发现。在不断增长着的敌意中(这适用于德国和法国，而不是英国，在英国，即使批评也是善意的)，这是一个缓慢的阐释过程。

归根到底，观察到与现实所见现象反向而行的现象的不可能性，是因为即使在宏观上很小的体积内，也有着大量的分子。取玻尔兹曼-格拉德极限这一技巧，是为了消除涨落，而这些涨落仅当体积极小，或是时间长到难以置信、完全超出人们观察的可能性时才起作用。我们同样要强调这一事实，即使在玻尔兹曼-格拉德极限下，我们也不能证明无论起始的状态分布如何，在一段时间后，起初具有不同性质的分离的分子必然会均匀地混合。只是由于均匀分布要远比非均匀分布多，状态分布在时间进程中才会变为均匀。因此，人们不能证明无论起初分子的位置和速度如何，在长时间后分布都会成为均匀的；人们能证明的，不过是在确定长的时间后，比之于非均匀分布，无穷多的起始状态会趋向于均匀分布。因此，不可逆行为并非玻尔兹曼-格拉德极限的结果。我们必须加上适当的初始条件。用玻尔兹曼的话来说："由于在微分方程自身中，绝对没有任何东西类似于

热力学第二定律，后者只能由关于初始条件的假设来机械地表征。”

关于佯谬，它们告诫我们的，只是如何构造一个高度不可几的初始状态，在确定的时间后，它事实上导致的是非常不均匀的分布。

20 世纪所发现的新的事实，都有利于玻尔兹曼的观点。我们现在感到，在热力学第二定律与宇宙的膨胀之间肯定有着联系；玻尔兹曼第一个指出(在他对策梅罗的第二个回答中)，需要宇宙学论证来说明这一事实：初始数据是所有可想象的集合的子集。当然，他运用的是他那个时代的物理学。我们不能因为他不知道广义相对论而指责他！

我们一直避免谈到量子力学，除了提到罗杰·彭罗斯关于量子力学中最神秘的方面——波包塌缩的想法。这一现象发生于测量，即微观对象与宏观物体，即测量仪器之间的相互作用中。它是量子力学中惟一的不可逆特性，也是惟一外在于量子力学的完全时间反演的基本方程的现象。关于这一论题，看来需要更多的研究。一种可能性是这一明显的不可逆性应归于整体系统(我们进行测量的微观系统和测量仪器)极大数目的自由度，于是需要运用一个典型的玻尔兹曼-格拉德论证(见和那儿所引的参考文献)。然而，如果我们承认这种结论，量子力学的波函数描述的就仅仅是我们关于系统的知识，而不是系统的状态，就像玻尔兹曼方程告诉我们并非系统的实际状态，而不过是测量的可能结果。

我们也应当引用哲学家 H. 普赖斯近来的卓越著作[1]。他总结了先前关于时间箭头的讨论，并捍卫了人们必须更认真地看待基本的时间对称性的观点。作者由此提出一种新的建议，以避免波包塌缩难题。

于是，人们惊奇地看到，大量的文献，甚至那些面向公众的文献，都争辩说：是的，玻尔兹曼正确地认识到了问题，但我们需要现代的研究来正确地理解它。但这种现代的研究，并非依然缺乏的对玻尔兹曼的物理论证的数学证明，而不过是混淆了的关于混沌现象的论证。

[1] 《时间之矢与阿基米德之点》，肖巍译，上海科学技术出版社 2001 年 10 月出版。

第六章

玻尔兹曼关系和熵的统计说明

热力学的概率解释

如我们所见，玻尔兹曼在回答洛喜密脱的批评中，首次使用了概率论证。直到那时，尽管他在论文中提到过概率，他似乎认为分布函数是利用数学分析的技巧以计算实际的分子数的方法，在他的论证中并不包含隐秘的概率假设。关于这一点，我们可以引用取之于他的基本论文第一部分结论中的著名语句，对这一语句，在前面两章中我们作了详尽分析："因此，已经严格得证，无论动能的起始分布如何，在非常长的时间进程中，它必然趋近于麦克斯韦所发现的分布。"

如我们在前面的章节中所试图表明的，他的表述仅当通过取适当的极限，统计涨落消失时才是事实上正确的。此外，概率在排除某些起始数据中起着重要的作用。

在玻尔兹曼起初的论文中，这些问题都还不明显。如克莱因所注意到的，在对洛喜密脱的回答五年之后，玻尔兹曼仍未表明他已经改变了他的观点，或是作为由于对于批评的反思，而深化了对于这一论题的理解；而是表现得好像不过是重新表述了他原本的观念。

相反，他承认人们不能证明熵“必然地”增加，由此达到热平衡，由于(如他在前一章中所引的文章中所说)这“实际上是概率理论的一个推论，对状态的任何非均匀分布，无论它多么不可几，它仍然并非绝对不可能的。”洛喜密脱的批评只不过使得“热力学第二定律与概率理论之间的内在联系”比以往更加清楚。在评论那些会导致熵减少的某些状态的不可几，使得它们实际上不可能时，玻尔兹曼说道：“人们甚至可以由不同状态分布的相对数目，以及它们的概率来计算，这会导致一种热平衡计算的有趣方法。”

在几个月之后的另一篇文章中，他发展了这一评论，我们现在将讨论这篇文章。然而，我们首先必须强调，如果玻尔兹曼在1871年已经开始意识到概率的重要性，那么强调热力学第二定律的统计解释的必要性的优先权，就必然应归功于麦克斯韦，因为他发明了我们在第3章中提到过的现在用他的名字命名的妖。关于这一点，人们也可以引证麦克斯韦给约翰·威廉·斯特拉特(后来的瑞利勋爵)的信：“热力学第二定律的真理度与下述命题相同：如果你把一满杯的水倒进海洋，你不可能再从海水中得到同样的一满杯。”

明确的应用概率于具有离散能量的气体

上面提到的文章中的评论，起源于一篇很长的学术报告，它可以被看作是玻尔兹曼关于热力学第二定律与概率微积分之间关系的研究的最高峰。事实上，这是他的第一篇清楚地宣布熵是一种状态的概率量度的论文，热力学第二定律被归结为表述了自然变化是从不可几态趋于更可几的状态。

这一报告的起初的文本是清楚的，给人以启发的。玻尔兹曼阐明了他想用下面的语汇来表述的思想：

> 在大多数情形中，系统的初始状态是不那么可几的状态，而它总是趋于更可几的状态，直到达到最可几的状态，即热力学平衡态。如果我们把这观点应用于热力学第二定律，就会把通常称作为熵的量等同于对应状态的概率。于是，让我们来考虑一个孤立的物体系统……。在这一变换中，由于热力学第二定律，系统总体的熵只可能增加。按我们目前的解释，其意思只不过是这一事实，即物体系统总体状态的概率，必然持续地增加：系统只能从一个状态，去往一个更可几的状态。

当然，玻尔兹曼考虑的是最简单的情形，即气体被封闭在一个有着镜子一样反射墙面的容器内，并且为避免与位置变量和速度变量是连续的这一事实相关的困难，他采取了他所喜爱的模型，离散模型，“一种不现实的幻想”，它对于让基本的思想表现出来是很有帮助的。因此，他思考一个 n 个粒子的集合，具有离散的能量$(0,\ \varepsilon,\ 2\varepsilon,\ \cdots,\ p\varepsilon)$和指定的总能量，其数值等于同一“量子” ε 的整数倍 $\lambda\varepsilon$，其中 λ 为整数。在这一模型中，分布函数为整数 $n_0,\ n_1,\ n_2,\ \cdots,\ n_p$ 的集合，其中 n_k 是具有能量 $k\varepsilon$ 的分子数目；玻尔兹曼称这一集合为状态分布。于是我们有

$$n_0 + n_1 + n_2 + \cdots + n_p = n, \tag{6.1a}$$

$$n_1 + 2n_2 + \cdots + pn_p = \lambda. \tag{6.1b}$$

然后，玻尔兹曼把每个分子具有一个指定的能量的分配方式叫做配容。显然，与一确定分布相一致的配容数 P 由下述关系给出：

$$P = \frac{n!}{n_0!\,n_1!\,n_2!\cdots n_p!} \tag{6.2}$$

如通常一样，其中我们用记号 $n!$ 表示前 n 个正整数的乘积（$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \cdots \cdot n$，而由定义，$0! = 1$）；$n!$ 读作“n 阶乘”或“n 的阶乘”。

为了说明这一配容数，及作为其推论，认识确定分布的概率，玻尔兹曼详尽考察了一个由七个分子（一个很小的数目）组成，总能量 7ε 的系统。由此不难发现从 0 到 7 之间 8 个非负整数（$n_0\ n_1\ n_2\ n_3\ n_4\ n_5\ n_6\ n_7$）可能的配置，即：

$$n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 = 7,$$

$$n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + 5n_5 + 6n_6 + 7n_7 = 7.$$

人们可以由试错法出发，或是加上先验的限制，诸如这一事实，即如果固定 n_0（在 0 和 6 之间）和 n_1（在 0 和 $7-n_0$ 之间），则 $n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 = 7 - n_0 - n_1$，且 $n_2 + 2n_3 + 3n_4 + 4n_5 + 5n_6 + 6n_7 = n_0$ 提供了非常严格的限制。下面是可能状态或分布的一览表：

(6 0 0 0 0 0 0 1)(s_1)(5 1 0 0 0 0 1 0)(s_2)(5 0 1 0 0 1 0 0)(s_3)
(5 0 0 1 1 0 0 0)(s_4)(4 2 0 0 0 1 0 0)(s_5)(4 1 1 0 1 0 0 0)(s_6)
(4 1 0 2 0 0 0 0)(s_7)(4 0 2 1 0 0 1 0)(s_8)(3 3 0 0 1 0 0 0)(s_9)
(3 2 1 1 0 0 0 1)(s_{10})(3 1 3 0 0 0 1 0)(s_{11})(2 4 0 1 0 0 0 0)(s_{12})
(2 3 2 0 0 0 0 0)(s_{13})(1 5 1 0 0 0 0 0)(s_{14})(7 0 0 0 0 0 0 0)(s_{15})

现在，利用方程(6.2)易于计算状态 sj 的配容数 Pj（$1 \leqslant j \leqslant 15$）。这个数目被玻尔兹曼称作状态的可互换性。它可以由 7! 来除以上面所列 15 种状态中每种中 8 个数的阶乘，得到下列结果：

$$p_1 = 7\ p_2 = p_3 = p_4 = 42\ p_5 = p_7 = p_8 = p_{12} = 105\ p_6 = p_{13} = 210.$$

$$p_9 = p_{11} = 140\ p_{10} = 420\ p_{14} = 42\ p_{15} = 1$$

于是只可能有 15 种分布和 $7 + 3 \cdot 42 + 4 \cdot 105 + 2 \cdot 210 + 2 \cdot 140 + 420 + 42 + 1 = 1\,716$ 个配容。最可几的状态对应于 $j = 10$，由 $n_0 = 3$，$n_1 = 2$，$n_2 = n_3 = 1$ 来表示（对于递减指数函数的一个非常粗略

的不连续近似)，而其余的 n_k 都为 0。于是，如我们所说，配容数为

$$p_{10} = \frac{7!}{1!2!3!} = 2 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 = 420.$$

因此，它的配容数要高于所有能量都集中于一个分子的状态的配容数 60 倍(在后一种情形中，分母将是 1! 6!)，高于所有能量平均分配于这 7 个分子的状态的配容数 420 倍(这一情形的分母是 7!)。

现在，玻尔兹曼不再研究作为碰撞结果的分布随时间的变化(运动学方法)，而是提出以一种“完全独立于这种分布是否发生或如何发生”的方法，来确定一种分布的“概率”。换言之，他提议用方程(6.1)来确定最可几分布，其根据是这么一种直觉：系统的变化最终将趋于这种分布。玻尔兹曼取由(6.2)式给出的配容数，作为一种确定分布的可能性量度，强调以这种方式，他认为配容是先验等概率的，就像在一个抽签游戏中，数字序列 1，2，3，4，5 由帽子中抽出的概率，与这 5 个数字以其他预先指定的顺序被抽出的概率相等一样。

这样，问题就归结为探求受约束的 P 的最大值。这一问题当所考虑的数目很小时是复杂的；但如在实际生活中所发生的那样，数目十分巨大，人们就可运用斯特林公式，按照它有 $n! = n^n e^{-n} u(n)$，其中 $u(n)$ 与其他因子相比，变化很慢，因此可看作为常数。这样，显然用 P 的对数演算就方便了。如果我们用斯特林公式，P 的反对数由下式给出：

$$\begin{aligned} -\log P = {} & n_0 \log n_0 + n_1 \log n_1 + n_2 \log n_2 \\ & + \cdots + n_p \log n_p - n \log n + r_n \end{aligned} \tag{6.3}$$

其中 r_n 变化很慢，可忽略(事实上，其变化率随 n 趋于无穷而趋于 0)。在方程(6.3)中，我们已说明了为方程(6.1a)所给的约束。

由于我们只考虑非常大的数目(从而也与我们使用斯特林公式这一事实相一致)，把变量 $n_k(k = 0, 1, 2, \cdots, p)$ 看作为连续的，而不是离散的变量是很方便的。这样 P 的最大值(或 $-\log P$ 的最小值)可

由所谓的拉格朗日乘子方法得出[以便考虑约束(6.1)]。这一方法基于这一事实，如果你有一约束，并寻求一个变量的极大值(极小值)，那么极值一般会低于(高于)在没有约束时的所得。例如，如果你寻找地球上离赤道最远的点，并不加约束，答案会很简单，有两个这样的点：北极和南极。然而，如果你加上所找的点必须在所给的通过地心的平面上，那么除非你选择好特殊的平面，否则答案将是不同的。

对此，拉格朗日发现了用以在约束条件下找出极值的著名规则，我们现在来回顾一下(那些已知这一方法的读者可以跳过这一段，那些想避开偏微分计算的读者可以跳过这一段和下一段)。如果我们有一个多变量函数 f，并在存在某些约束的情形下寻找它的极值，这些约束表示为某些包含函数所依赖的变量的表示式 ϕ_1，ϕ_2，…等于零，于是我们可以寻找一个修正过的函数的极值，这一函数通过对 f 加上函数 ϕ_1，ϕ_2，…而得到，而后者每个被叫作拉格朗日乘子的参量 λ_1，λ_2…所乘。如果我们以这种方式来确定极值，它们将依赖于乘子，而后者的值现在又为其他相应的约束所确定。

现在，让我们来看玻尔兹曼如何应用拉格朗日方法于他的函数 $-\log P$。如果我们用 α 和 $\beta\varepsilon$ 来表示所需要的拉格朗日乘子，用 $A = A(n_k)$ 和 $B = B(n_k)$ 来表示方程(6.1)左边的和所给出的线性函数，我们必须发现函数 $-\log P + \alpha(A - n) + \beta\epsilon(B - \lambda)$ 对于每个变量 n_k 的求导(如应用拉格朗日方法时所常见的，对 α 和 β 的求导得出表示约束的关系)为零。由于 $n_k \log n_k$ 对 n_k 的导数为 $1 + \log n_k$，而 A 和 B 对它的导数分别为 1 和 k，我们得到：

$$1 + \log n_k + \alpha + \beta k\epsilon = 0 \ (k = 0, 1, 2, \cdots, P)$$

或

$$n_k = \bar{n} e^{-\beta k\epsilon} \ (k = 0, 1, 2, \cdots, P), \qquad (6.4)$$

其中 $\bar{n} = e^{-\alpha-1}$。由此，可获得满足方程(6.1)的两个乘子(或等价的 $\bar{n}$ 和 β)。

现在，对那些对偏微分方程不熟悉，无法领会上面内容的读者，

我们提供替代的方法，以证明方程(6.4)中给出的 $\log P$ 的极大值。这一证明比上面所给的更为精致和完备，但也稍许要长些(如果不是这样，为什么人们要费心去求微分？)，其缺陷是它总是使学生们在看到这些精致的证明时感到迷惑。人们是如何发现这些证明的呢？或者为什么他们会想到这种特殊的表述？其实，精致的证明总是在我们已知道想要证明的结果后才出现的，所以它们看上去才如此的不可思议。在这些证明的背后，有着艰辛的和长期冗长乏味的劳动，学生们无须了解这些，除非他想得到上述问题的答案。这至少是像高斯这样伟大的数学家对于证明的看法："当证明构造起一个宏伟的建筑，脚手架就不应再被看见。"或许正因为脑海里有着这句话，他总是只发表精炼过的证明，雅可比称他为"数学之狐"，因为他就像狐狸总用尾巴擦去留在地上的痕迹一样。现在，人们则有更多的兴趣来看看狐狸所曾追循的路径。

出发点是一个基本的不等式，我们在下一章还会遇到它。这一不等式形式如下：

$$x\log x + 1 - x \geqslant 0 \ (x > 0). \tag{6.5}$$

今天，我们可以通过要求袖珍计算器标绘出左边函数的图形来看这一不等式。这样，我们可以检查这一函数是非负的，且仅当 $x = 1$ 时为零。如果我们用 $1/x$ 代替 x，易于得出一个较少经验的证明。于是，在一个明显的重新安排之后，这一不等式读作 $\log x \leqslant x - 1$，即它归结为说对数曲线总是低于在(0，1)这一点的正切。

我们如何利用这一结果呢？首先，我们对 $\bar{n}e^{-\beta k\varepsilon}$ 引入一个简短的表示，我们简单地称之为 $\bar{n}_k(k = 0, 1, 2, \cdots, P)$。这里 $\bar{n}$ 和 β 以这种方式选择，使得当我们用 $\bar{n}_k$ 取代 $n_k(k = 0, 1, 2, \cdots, P)$ 时，约束(6.1)得到满足(可以证明这一选择总是可能的，并将导出一个惟一的答案)。我们想表明，当 $n_k = \bar{n}_k$ 时，$-\log P$有惟一的极小值。

在证明开始时，我们用 $n_k\sqrt{n_k}(k = 0, 1, 2, \cdots, p)$ 取代方程(6.5)中的 x。在写出以上述方式取代 x 后的方程(6.5)后，我们用相应的(正)因子 $\bar{n}_k$ 乘每个不等式，并对所得到 $p+1$ 个不等式求和。结果是左边的 $p+1$ 项的和为非负的，并当且仅当对数辐角中的每个值为单位的时，左边的和为零。一次简化发生于来自于 $1-x$ 的项：它们消失了。事实上由方程(6.1a)得知，项 $\bar{n}_k$ 的和与 n_k 的和都为 n，彼此相消。于是我们剩下

$$n_0\log(n_0\sqrt{n_0}) + n_1\log(n_1\sqrt{n_1}) + \cdots + n_p\log(n_p\sqrt{n_p}) \geqslant 0, \tag{6.6}$$

依据对数性质，这式可写成如下形式

$$\begin{aligned} & n_0\log n_0 + n_1\log n_1 + \cdots + n_p\log n_p \\ \geqslant\ & n_0\log\bar{n}_0 + n_1\log\bar{n}_1 + \cdots + n_p\log\bar{n}_p. \end{aligned} \tag{6.7}$$

现在 $\log\bar{n}_k$ 为一常数加上另一被 k 所乘的常数。因此，方程(6.7)右方，为一常数乘上方程(6.1a)中的和，加上另一常数乘以方程(6.1b)中的和。由于 n_k 和 $\bar{n}_k$ 两者都满足(6.1a)和(6.1b)，我们可以在方程右边用 $\bar{n}_k$ 取代 n_k，并得出

$$\begin{aligned} & n_0\log n_0 + n_1\log n_1 + \cdots + n_p\log n_p \\ \geqslant\ & \bar{n}_0\log\bar{n}_0 + \bar{n}_1\log\bar{n}_1 + \cdots + \bar{n}_p\log\bar{n}_p. \end{aligned} \tag{6.8}$$

但方程左边是 $-\log P$，而右边为当 $n_k = \bar{n}_k$ 时，这一函数所取的值。因此，$-\log P$ 有在方程(6.4)满足时获得的惟一的极小值，如我们需要求证的。

请注意，第二种证明尽管长了些，实际上证明了更多的东西。它证明极值其实是极小值(而不是极大值)，而我们在第一种证明中没有费心去查验。另一优点是它能拓展到处理连续变量，而不是离散变量的情形，而不必引入高等的变分演算工具，如我们在下一章将会看到的。

连续能量情形中的应用

玻尔兹曼的文章继续讨论气体能量取连续值时的情形。当然，在这种情形中，人们也必须找出对于 P，或是它的对数的表达式。一种明显的方法是用前述方法把连续的情形离散化，然后再取当离散变量变为连续时的极限。其实这正是玻尔兹曼所采用的方法。从根本上说，求和将被积分所取代。

这里，一个与状态的先验等概率性相关的小问题出现了，如克莱因所强调的，玻尔兹曼聪明地利用了这一点，首先获得了一个错误的结果，这或许表现出对于他如此钦佩的麦克斯韦论文的一种戏剧性的急剧转折。在连续能量的情形中，如何确定等概率状态并非直接明了的，而是如玻尔兹曼自己所指出的，存在一条指导性原理，它来自下述事实：相空间中的体积元在时间演化中是不变的(由于刘维尔定理)；因此，等概率的集合是那些在相空间中有着相同体积的状态。人们会犯的错误是取能量轴上的部分长度。这样，如果 E 表示能量，我们忽略了一个因子 $E^{\frac{1}{2}}$(我们在第四章中已遇到过这个问题)。一旦这一点得到澄清，即可清楚地表明，$-\log P$ 精确地等价于前面为玻尔兹曼在他 1872 年的基础性论文中所发现的量 H，并由 $f\log f$ 对相空间中通常的体积元积分而得出。约束(6.1)现在成为 f 和 $|\xi|^2 f$(为简单性起见，我们仅限定于不带彻体力的单原子气体，即使广延在这一情形中是无足轻重的)，对于所说的体积元的积分有着确定的值(正比于总的分子数和总能量)。在这一情形中，最小化 H 或最大化 $\Omega = \log P$ 的问题，是变分演算中的基本问题，其结果是麦克斯韦的速度分布；P 的对数的相应值(玻尔兹曼称之为可置换性)等于平衡态的熵，除了一个因子外(对于玻尔兹曼归一化为 2/3，因为他看来未能区分内能与温度)。

这一关系，写成形式为

$$S = k\log W \tag{6.9}$$

其中 S 表示熵，W 表示状态的概率或可能性，而 k 为玻尔兹曼常数（但玻尔兹曼从未用过这常数），它现在已雕刻在玻尔兹曼的墓碑上。

我们在这儿打住，提一下按照埃布林的说法，第一个想到概率的对数的，是数学家德·莫伊夫瑞。我们同样注意到，在现代信息论中也出现了同样的公式。它是由申农引入信息论的，据说他说过是冯·诺伊曼建议熵这个名称的，因为它看上去像是熵的统计公式，而且反正没有人知道熵是什么。

玻尔兹曼从这一计算中得出了一些结论。首先，他说：

> 人所共知，当一个物体系统经历纯粹可逆的变化，系统的总熵保持不变。相反，如果在系统经历的变化中，有些是不可逆的，它的熵就必然要增加……。由于上述关系，对于物体集合的可置换性的测度 $\Sigma\Omega$ 也同样如此。因此，在热力学平衡态，除了一个常数因子外，这一可置换性测度量与熵相一致，但即使在每个不可逆的过程中，当它连续增加时，也有意义。
>
> 人们即刻可演绎出两个论断：第一个说的是一个物体系统经历了几个变化，其中至少有一些是不可逆的……如果在过程的开始和结束，都证明系统处于热力学平衡态，这一系统的总的熵能立刻计算出来；在两种情形中，它都等于可置换性测度的三分之二。因此，这第一个论断表达的是：在系统经历了变化后，总的熵始终要大于初始值；当然，可置换性测度也同样如此。第二个论断说的是一种气体，它经历了一个变化，其中初态和终态都并非必然是热力学平衡的，因此人们无法计算初态和终态的熵，但人们总是能计算我们称之为可置换性测度的这个量；而这里再一次它的最终的值必然大于起始值。人们同样可以证实，最后这个论断能毫无困难地推广到由几种气体组成的系统，推广到多原子分子系统和在外力作用下的系统。

玻尔兹曼也得出了下述一般性的结论：

> 让我们考虑任何一个经历了任意变化的系统，其初始态和最终态并非必须是热力学平衡态；在这些条件下，系统中物体系综的可置换性在这过程中将不断增加，或至多在无限接近热力学平衡态的可逆过程中保持不变。

在得到这一结论时，玻尔兹曼看来显然已意识到，他得到了一个非常普遍的原理，并认为这一原理有可能不限于气体的情形，而应推广到固体和液体，即使在试图作更详细的描述时，对这些更一般情形的精确的数学处理会遇到困难。

下一个应用玻尔兹曼关系的科学家是普朗克，用于他著名的关于黑体辐射的研究中(见第十二章)。在第三章中引用过的爱因斯坦的一篇较短文章中，我们读到这么一段关于方程(6.9)的论述："这是一种关于系统的熵的表示……它由玻尔兹曼在理想气体的研究中所发现，并为普朗克假设适用于他的黑体辐射理论……"。然而，爱因斯坦看来并不怎么满意玻尔兹曼讨论概率的方式。在他1905年关于光量子的基础性论文中，我们读到：

> 概率一词的使用，其意义不同于概率论中对它所作的定义。尤其是在有些情形中，所用的理论图像已经足够确定到允许采用演绎方法，而不用作假说性规定，但往往还是假设性地规定了"等概率的情形"。

即使他在这句话中没有明确地提及，他看来指的是玻尔兹曼的配容方法。在同一篇论文中，他把方程(6.9)叫做玻尔兹曼原理。他认为他能省去上面所解释的这一类计算，希望"消除阻碍使用玻尔兹曼原理的逻辑困难"。事实上，爱因斯坦认为，如标准热力学所规

定的，气体的熵增经历了绝热过程，并发现在假设了方程(6.9)后，对应于体积 V_a 和 V_b 的两个状态的概率比等于$(V_a/V_b)^N$，其中 N 为气体中的分子数。然而，玻尔兹曼原理要比爱因斯坦当时所设想的更为强有力和有用，爱因斯坦在的参考文献中所宣称的另一篇论文始终未能出现。但他并未停止对配容这一概念的批评，如人们从下述两段引文中可见，这两段话分别来自于他发表于 1909 年和 1910 年的两篇论文：

无论是玻尔兹曼先生，还是普朗克先生，都未能给出 W 的定义。

> 通常 W 被认为是配容的数目……。为了计算 W，人们需要考虑系统的完备(分子力学的)理论。因此，令人怀疑的是玻尔兹曼原理是否有意义，如果不存在一个完备的分子力学理论，或是其他描述基本过程的理论的话。从现象论的观点看，不规定这么一种基本过程的理论，[方程(6.9)]看来是没有内容的。

然而，令人吃惊的是，有迹象表明爱因斯坦并未完全理解经典统计力学的微妙之处(这一点或许会使有些读者感到安慰！)。实际上，在他的另一篇写于 1903 年的论文中，他在推导出热力学第二定律时，以下述假设的方式，忽视了洛喜密脱佯谬："我们将不得不假设更可几的分布总是追寻着较不可几的分布，即 W 总是在增加，直到分布成为常数和 W 达到极大值。"

显然，"总是"一词重复了两次，而并无进一步的说明，这表明洛喜密脱佯谬被他忽略了，尽管爱因斯坦知道玻尔兹曼在论文中提到过它。如我们在下一节将看到的，玻尔兹曼也只是到了 1895 年，即在洛喜密脱提出可逆性批评几乎 20 年之后，才达到最终完全理解这一微妙之处的阶段。

几年之后，爱因斯坦已成为著名的科学家和苏黎世大学的教授，讲授分子运动论课程。在一篇发表于 1911 年的论文中，与刚才所引

的批评相仿，他说："那时(1903 年)我已经不满意于自己的推导，因此此后不久我又给出另一个推导。"这另一种推导出现在前面所引的 1904 年的论文中，但仍然包含着同一个假设。这看来一定程度地表明了爱因斯坦这方面的粗心，因为在前面所引的 1910 年的论文中，他仔细地写下了关于统计形式的热力学第二定律的表述："物理现象的不可逆性只是表观的……一个系统很可能走向具有更大概率的状态，如果它碰巧处在一个概率相对较小的状态的话。"这里，如理论上所要求的，很可能一词取代了总是。

清楚地表明爱因斯坦完全理解了玻尔兹曼论证的证据，来自于他 1915 年发表的一篇论文中关于玻尔兹曼的这句话："他[关于热力学第二定律]的讨论是相当冗长和精巧的。但这种(为理解它所需要的)思考的努力因为这一论题的重要性和优美而得到了丰厚的回报。"

关于爱因斯坦早期的论文与玻尔兹曼的成果之间的关系的评论和信息，我们将在第十二章进一步给出。

所谓的 *H* 曲线

熵与概率之间的联系的确澄清了热力学第二定律的统计解释的某些方面，但也可对之提出许多批评，主要关系到基本定律的时间对称性与统计平衡的进路之间的协调问题。在下一章，我们将讨论吉布斯和其后的作者的思想。这里，我们想讨论历史发展中的一个重要部分，它发生于玻尔兹曼对于洛喜密脱和策梅罗的批评的回答中。实际上，我们要讨论的是玻尔兹曼与一群英国科学家之间的争论。

这场争论不同于第一章中提到过的那次，而与比热率问题相关。这一新的讨论起因于 E. P. 卡尔弗韦尔的一篇文章，他在其中宣称不可能一般性地证明一组粒子趋向于玻尔兹曼位形，在这种位形中，能量平等地分布到所有自由度上。卡尔弗韦尔诉诸可逆性原理，进而断言对每一个趋于能量平等分布的位形，必然存在一个背离这种分布

的位形。这多少有些类似于洛喜密脱的批评。

对于这类问题的广泛兴趣，导致英国皇家学会任命了一个专门的委员会来研究“我们关于热力学第二定律知识的当前状况”。这一委员会仅由两名成员组成：J. 拉莫尔和 G. H. 布赖恩。后者在 1891 年的会议上就这一问题作了第一个报告，其中充分地强调了统计方面，并对不稳定性的作用作了一些评论。报告未得出确定的结论，尽管使用了相关于混合的定性类比，并提出了在说明中不乞灵于以太的作用的目标。布赖恩报告的第二部分是在英国皇家学会 1894 年的牛津会议上提交的，被认为是对此专题的公正的总结。玻尔兹曼也出席了这次会议，并写了一个附录。

卡尔弗韦尔可不那么容易被说服，他坚持问一个简单的问题：“是否有人能准确说出 H 定理证明了什么？”在关于卡尔弗韦尔问题的下述讨论中，S. H. 伯巴利指出，在人们处理碰撞前后的分子状态的方式上有一点差别，而这是由于随机的外部干扰造成的。他接着说：“所以 H 有一种普遍的减少的趋势，尽管可以想象在某些特殊情形中它会有所增加。正如在政治事务中，向着更好的变化是可能的，但所有变化的趋势是从坏的趋向更坏。”

我们注意到玻尔兹曼在他关于气体理论的讲演中，引用了伯巴利的论文作为他的“分子混沌”假设的起源。我们也注意到伯巴利是第一个用字母 H 取代 E 来称呼我们称为 H 函数的人，玻尔兹曼采用了他的这一选择。

这一讨论在《自然》杂志的栏目里持续了几个月，直到 1895 年 2 月收到并发表了玻尔兹曼的一封长信。其中的一部分主题为能量均分问题，我们将在第八章讨论。另一部分的主题是讨论卡尔弗韦尔和伯巴利的论文，为我们这里的兴趣所在。

首先，玻尔兹曼指出，如果按照卡尔弗韦尔的可逆性批评，就意味着我们能证明氧和氮不会扩散，或换言之，它们会像它们的混合那样容易地分离。因此，他提醒读者：

> 仅从运动方程，绝不可能证明最小函数 H 必然总是减少的。只有从概率定律中，才能推论出如果起始状态并非为某一目的特殊安排的，而由偶然性任意地支配着，H 减少的概率就总是大于它增加的概率。

接着，玻尔兹曼考虑一个有着完全光滑和弹性的器壁的容器，里面装有运动了无穷长时间的数目确定的气体分子。在这种情况下，所有的规则运动都应被排除。玻尔兹曼这里的意思，可以用一种被排除的运动为例来说明：所有分子都在一个平面上运动。这样在大多数时间中，H 将接近于它的最小值 $H_{\min}$。让我们来构造所谓的 H 曲线，即让我们取时间为横坐标，画出其纵坐标为相应的 H 值的曲线(我们在前一章已看到这一曲线的一个例子，虽然仅限于一个相当短的时间间隔内)。纵坐标的绝大多数都非常接近于 $H_{\min}$，但由于更大的 H 值并非数学上不可能、而只是非常不可几的，因此曲线会有一些高于 $H_{\min}$ 的极大值，尽管其数量很少。

我们现在来考虑某个坐标 $H_1 > H_{\min}$。这时有两种可能的情形。H_1 可能非常接近于一个极点的顶部，这样无论我们沿代表时间的轴的正向还是负向行进，H 都将减少。第二种情形是 H_1 处于曲线上趋近于极点、或从该点下降的一段上，于是[在第二种情形中]H_1 一边的坐标将大于 H_1，而另一边的则小于 H_1。但由于更高的极点是如此极端地不可几，第一种情形是最可能的；并且如果我们在曲线上随机地选取一个 H_1 的确定数值，虽然并不确定、但非常可能的是，这一坐标当我们沿任一方向行进时都将减少。

我们注意到，为了避免任何可能的误解，玻尔兹曼在这里说到的是条件概率：一旦 H_1 确定并且有一明显大于 $H_{\min}$ 的数值，那么第二

种情形是极不可能发生的。同样值得注意的是玻尔兹曼断言 H 的值必然有时会升到最小值之上。这一点与他以往所有文章中所说的都不同。特别是在他于 1886 年 5 月 29 日维也纳科学院上所作的题为《论热力学第二定律》的报告中，我们读到：

> 由于一个确定系统绝不会自动地过渡到另一个同等可能的状态，而只会过渡到一个更可几的状态，同样，不可能构造这样一个物体系统，它在穿越过不同的状态后，会周期性地回到它原初的状态，这是一种永动机。

在这一段文字中，玻尔兹曼似乎陷入了与爱因斯坦后来所犯的同样的错误，如我们在前一节中所见到的：朝向更可几状态的演化是自发的。这一讲演是非技术性的这一事实，也只是他表述的不精确的一种借口。因此，可以感到，他对热力学第二定律的统计解释的最终阶段，只是在卡尔弗韦尔的发人深省的问题之后才达到的。

让我们回到 1895 年的论文。玻尔兹曼后面写道：

> 我们现在与卡尔弗韦尔一起，假设一种气体处于一确定状态。如果在此状态 H 大于 $H_{\min}$，那么并非确定、但非常可能的是，H 将减少，直到最后减少到并不那么精确地等于、但十分接近于 $H_{\min}$ 的值，并在以后的时间里也都这样。如果在紧接着的状态中，我们反转所有的速度，我们会得到一种罕见的情形，其中 H 在某一时间里会增加，然后再次减少。但这种情形的存在并不能反驳我们的定理。相反，概率理论本身表明，这种情形的概率并非数学上等于零，而只是极其小的。
>
> 因此，伯巴利先生是错误的，如果他承认 H 增加的情形与其减少一样多的话；而卡尔弗韦尔也错了，如果他说任何证明所能表明的，只是取所有得自于从位形退却的 $\mathrm{d}H/\mathrm{d}t$ 的值的某种

平均，dH/dt 将会是负的。相反，我们已经证明 H 有减少趋势的可能性，无论是向前面的还是后面的位形转化。我在自己的论文中所证明的如下：H 非常接近于其最小值是极端可几的状态；如果它更大些，它可能增加或减少，但其减少的概率总是更大些。这样如果我获得了 dH/dt 的某个值，这一结果并非对每个时间元 dt 都成立，而只是一个平均值。但分子数目越大，这一结果所适用的时间间隔 dt 就越小。

玻尔兹曼在这里再次使用了这一事实，我们正在谈论的是条件概率，而伯巴利寻求的是时间演化；仅当我们确定了一个明显大于 H_{min} 的 H 的值，我们才能说朝向更小值运动的概率要高于朝向更大值运动的概率。但这既适用于向前的演化，也适用于向后的演化。这样，如果我们考虑 H 曲线，确实 H 增加的情形与其减少的情形一样多。因此，只有当初始数据明显地不同于平衡态，我们才能期望 H 减少的概率会很高。

为了说明这一点，玻尔兹曼采用了一个掷骰子游戏的类比。如果列出一无穷长时间的掷骰子序列，我们可以用与 H 曲线类似的图形来代表这一结果。设 n 为一很大的整数，让我们用 $A_j(j = 0, 1, 2, \cdots)$ 来表示从第 $j+1$ 次到第 $6n+j$ 次（包括后者在内）之间的 $6n$ 次投掷中数字 1 面朝上的次数。让我们在平面上构造一个点的序列，相继的横坐标为 $j/n(j = 0, 1, 2, \cdots)$，纵坐标为 $y_j = (A_j/n - 1)^2$。玻尔兹曼称这图形为 P 曲线，H 曲线在这游戏中的类似物。给定 n 很大这一事实，所考虑曲线上大多数点的纵坐标将很小。让我们考虑 P 曲线上所有其纵坐标精确为 1 的点，并称这些点为“点 B”；这些点表示的是这么一种情形，在 $6n$ 次投掷中，我们偶然掷出了 $2n$ 次 1。这当然是极端不可几的，但并非不可能的。设 m 为一比 n 小许多的数，让我们由每一点 B 的横坐标继续向前一距离 $6m/n$，我们很可能会遇到一个纵坐标小于 1 的点。遇到大于 1

的纵坐标的概率极小，尽管并非为零。玻尔兹曼说到："按照与卡尔弗韦尔相同的推理方式，我们会相信向后走"相同的距离，"有可能我们会遇到纵坐标>1"。但这是不正确的，纵坐标可能在向前和向后的方向上都会减少。

玻尔兹曼甚至于计算了某种积分，提出了 $-1/3$ 的值。他赶紧说明这并非"一个通常的微分系数"，而不过是一个平均的增长比率。玻尔兹曼说："P 曲线属于一大类处处没有惟一确定切线的曲线……，这也同样适用于气体理论中的 H 曲线。"

在另一篇所载日期为1897年圣诞节，题为《论所谓的 H 曲线》的论文中，玻尔兹曼再次提起 H 曲线这一主题。在这篇论文中，玻尔兹曼通过基于随机抽取的模型，引入了对 H 曲线的另一个类比。N 个白球和 N 个黑球被置于一瓮中，每次随机地选择一个，然后放回瓮中。我们进行了 $2N+1$ 次抽取（N 的数目很大），并标记为

$$Z_{-N},\ Z_{-N+1},\ \cdots,\ Z_0,\ Z_1,\ \cdots,\ Z_N$$

设 n 为一小于 $2N+2$ 的正整数，我们用 a_k 表示在 n 次抽取 Z_k，Z_{k+1}，…，Z_{k-n+1} 中白球的数目，其中 k 为 $-N$ 和 $N+1-n$ 之间的一个整数（正的，负的，或零）。现在，让我们来考虑有着横坐标 (k/n) 和纵坐标 $|1-2(a_k/n)|$ 的点 B_k。

玻尔兹曼称点 B_k 的集合 $\{B_k\}$ 为抽彩的 H 曲线。由于 n 数目很大，a_k 非常接近于 $n/2$，大部分曲线接近于 x 轴。然而，由于 N 非常大，曲线会有一些峰值，偶尔明显地偏离 x 轴。例如，如果 $N=2^n\times10^3$，那么在上面提到 $2N+1$ 次抽取中，就会有 2×10^3 次机会连续 n 次抽中黑球。如果 k 是第一次抽中这一序列的标示，具有横坐标 k/n 的点的纵坐标将为1。类似地，会有 2×10^3 次连续抽到 n 个白球的机会，相应的点的坐标也为1。因此，在 $2N+1$ 次抽取中，会有 4×10^3 个最大可能高度，即数值为1的峰值。此外，还会有更大数量的较低的峰值，同样明显地偏离了 x 轴。

同样，如果我们考虑一个确定的纵坐标 y_1，称具有这一坐标的点为 Q，那么这一点极不可能属于一个其高度大于 y_1 的峰值。

玻尔兹曼认为他能肯定，专业的几何学家会轻视这种 H 曲线。他声明他的目的就是要构造一个模型，以表明假设 H 曲线在气体分子运动论中有某些性质是不矛盾的。这一 H 曲线类似于“被连续化的抽彩 H 曲线”。特别是这一曲线将是连续的，但在任何一点都不会有切线。人们不可避免地会想到，玻尔兹曼所写的这些论文是随机动力学和威纳的布朗运动理论的先驱，在这些理论中，具有切线的轨迹的集合为空集。

第二种随机模型的确激发了埃伦菲斯特，他引入了一个类似的、但却比玻尔兹曼的模型更广为人知的模型，其中球的数量为从 1 到 $2N$，分布在两个盒子 A 和 B 中。从 1 到 $2N$ 之间，随机选取一个数，对应数字的球从它所在的盒子中移到另一盒子中。这一过程被重复任意多次之后，显然在两个盒子中的球数会趋于相等，但对于平衡值会有涨落，正像玻尔兹曼的模型中所说明的那样。卡克对这一模型作了详尽的研究和说明。

注意到玻尔兹曼关于 H 曲线的论文的日期(1895 年和 1897 年)是非常重要的。这些讨论为他于 1896 年回答策梅罗再次提出的批评作了准备。同样值得注意的是，在这两篇论文的前一篇中，他讨论了一个宇宙学问题。他说：

> 我想用我以前的一位助手许茨博士的思想来结束本篇论文。我们假设整个宇宙处于热力学平衡之中，并将永远静止。宇宙中的一个(也仅有一个)部分处于一确定状态，其偏离热平衡态越远，这一状态的概率就越小；但这一概率越大，宇宙本身也就得越大。如果我们假设宇宙足够的大，就能使一个相对小的部分处于如我们所愿的状态(无论这一状态如何远离热平衡态)。我们也能使概率大到使我们的世界处于它目前的状态，尽管整个宇

宙处于热平衡中。这个世界是如此地远离热平衡，以至于我们无法想象它目前状态的不可几性。但另一方面，难道我们能够想象这个世界在整个宇宙中是多么小的一部分吗？假设宇宙足够的大，它的像我们的世界这样小的一部分的目前状态的概率，就不再算小了。

如果这一假设是正确的，我们的世界将愈来愈回复到热平衡；但整个宇宙是如此之大，以至于在未来的某个时候，其他某一世界会像我们的世界目前这样偏离热平衡。于是，前面说到过的 H 曲线将成为宇宙中所发生事件的表征。曲线的顶峰将代表存在着可见的运动和生命的世界。

这一论证，显然是与玻尔兹曼发表于 1897 年的对于策梅罗的第二点回答中所使用的论证相联系的。

第七章

玻尔兹曼、吉布斯与平衡态统计力学

引　言

在这一章中，我们将讨论比迄今所考虑的单原子气体更复杂的系统的平衡态统计力学，也要讨论这些系统趋向于热平衡的问题。

开辟这一统计力学分支的功劳，必须再一次地归功于玻尔兹曼，归功于一篇他写于1884年但却很少像他的其他论文一样经常被引用的基础性论文。在这篇论文中，他提出了一个假说：在可能的稳态分布中，有些可以被解释为宏观平衡态。玻尔兹曼的这一根本性的工作被吉布斯在一篇经典论文中重新提起、拓展和阐述，我们今天所使用的术语，也是由吉布斯所引入的。事实上，统计系综(用吉布斯的术语说)被玻尔兹曼称作为单子态。上面提到的那篇论文中提出的问题如下：什么样的统计性稳态分布家族能有这样的性质，使得当它

们的参量发生一个无穷小的变化时，系统的平均总能量 E、压强 p 和体积 V 的无穷小的变化是这样的，即$(dE+pdV)/T$(其中 T 为每个粒子的平均动能)是一个恰当微分(至少在热力学极限下，当 $V\to\infty$，$N\to\infty$，而 N/V 保持为有限时)？ 玻尔兹曼称这些家族为正规的。 玻尔兹曼对他自己问题的回答是，至少有两类这样的系综：因子的(吉布斯的微正则系综)和全体的(吉布斯的正则系综)。

尽管与麦克斯韦已考虑过的没有外力作用的稀薄气体的平衡态研究相比，玻尔兹曼发起了对更为一般情形的平衡态研究，但通常与这一领域的统计力学方法(发展的最完备的方法)相联系的却并非他的名字，而是吉布斯。 甚至所用的词汇(微正则系综，正则系综，巨正则系综)也是那些应归于吉布斯的，尽管前两个系综是由玻尔兹曼(用不同的名字)明确定义和使用的。 然而无疑，用克莱因的话来说，“是玻尔兹曼，而不是麦克斯韦或吉布斯，明确地确立了如何把热力学第二定律与概率相联系，创立了统计力学这一学科。”

为清晰起见，我们可以加上一句：是吉布斯发明了这一学科的名称。 如我们在后面要指出的，吉布斯当然知道玻尔兹曼的优先权。那么，为什么除了一些对玻尔兹曼的一般承认之外，吉布斯的名字会凸显了出来呢？ 这是一个有趣的问题，人们或许想给出一个易于理解的回答。

在着手这一讨论之前，让我们先来谈一谈吉布斯。

19 世纪伟大的美国科学家：J. W. 吉布斯

让我们借助于 M. 克莱因的两篇杰出论文，来回忆这位“纽黑文的乔赛亚·威拉德·吉布斯先生”，他于 1871 年 7 月 13 日被耶鲁董事会任命为数学物理学教授。 他出生于 1839 年 2 月 11 日(与玻尔兹曼同月出生，但却早了 5 年)，是玛丽·安娜·范·克利夫和老乔赛亚·威拉德·吉布斯惟一的儿子和 5 个孩子中的第四个孩子。 他的

父亲是位著名的语言学家，1809 年毕业于耶鲁大学，并从 1826 年开始在同一所大学的神学院教授经典文献，直至 1861 年去世。四代吉布斯和威拉德的儿子以前都毕业于哈佛学院，包括萨缪尔·威拉德，他于 1659 年曾担任了一段时间该学院的执行院长。吉布斯母亲的家庭背景也同样给人留下深刻的印象：包括一连串的耶鲁的毕业生，其中一位曾做过今天的普林斯顿大学(当时的新泽西学院)的首任校长，而几位这所学校的毕业生都从事了科学生涯。

吉布斯 1858 年毕业于耶鲁学院，因为拉丁文和数学成绩的优异，赢得了一系列的奖金和奖学金。他继续在耶鲁研究生院学习，并于 1863 年获得了他的哲学博士学位，成为被美国大学授予这一学位的第一批学者之一。他的博士专业为工程学，而学位论文的题目为《论正齿轮装置中齿轮的齿形》，是一种几何学与运动学的运用。然后，他留校任教，讲授了三年基本的拉丁文和自然哲学(物理学)。同时，他继续研究工程学问题，并于 1866 年获得了一项关于改进铁路车辆刹车的专利。然而同年，他也向康涅狄格州艺术和科学院提交了一篇论文，这篇论文论述的是力学中所使用的量，包含了对经典力学中质量概念所扮演的双重角色(惯性质量和引力质量)和由定义质量为物质的量而引起的混乱等的非常清晰的讨论。

在同一年的 8 月份中，吉布斯乘船去了欧洲，这也是他毕生中仅有的一次长时期的远离他所出生的城市。他与他的姐姐安娜和朱莉亚一起旅行，他的父母和另两位姐妹都已不在人世。他在巴黎大学、柏林大学、海德堡大学各花了一年时间，聆听了许多课程，广泛阅读了数学和物理学的文献。他所曾听过课的科学家名录是令人肃然起敬的，因为其中包括了刘维尔、达博克斯、克罗内克、魏斯特拉尔斯、亥姆霍茨和基尔霍夫，但没有证据表明他曾在那儿当过研究生，或曾开始过任何他自己的研究，或是曾打算过这么做。

在他回到纽黑文两年之后，吉布斯没有找到固定的工作，他的未来也不那么明朗。显然，凭着从父母那儿继承的遗产，他的生活不

成问题。他从未结婚，继续与他的未婚的姐姐安娜，以及朱丽亚、她的丈夫和她们的人口见长的家庭一起，住在他父母原来的房子里。

他的财政上的自立和学术上的能力肯定在耶鲁大学的社群中广为人知，因为1871年他被任命为新设立的数学物理学教授，校方的记录上包含有不寻常的限定："没有薪金"。确实，在他作为教授的头一个十年中，他每年也只教一两个学生。两年之后，鲍登学院答应每年付给他1 800元，但他拒绝了。直到1880年，当时新建立的约翰·霍普金斯大学提供给他一份有诱惑力的工作，而他也倾向于接受时，他原来的大学才给了他一份薪金；尽管这只有霍普金斯大学提供的2/3，但已足以说服他留下来了。

对吉布斯1871年的任命，比他首次发表论文早了两年，这在当时的美国也并非是不寻常的事。我们提醒读者，比吉布斯年轻五岁的玻尔兹曼，1869年当他是个学生并获得一个职位时，已开始发表文章。1871年，他正准备发表他最著名的论文。

吉布斯的第一篇论文是关于热力学的，并即刻证明了他对于这一领域的精通。他对于这一主题的选择，与他在欧洲所出席的演讲无关，而作为一个非常简练的作者，吉布斯也并没有透露过他作此选择的理由，尽管他于1871年和1873年之间对于热机的兴趣或许可以提供一条线索。

论文的题目《流体热力学中的图示方法》看上去并不是非常吸引人，但其内容，却通过把熵当作独立变量这一甚至克劳修斯也没有做过的事，极大地改变了热力学的内容。尤其是他分析了熵-体积图形及其"对于其他方法的实质优越性"，因为它表明了一种物质的蒸汽、液体和固态同时并存的区域，可还原为更通常的压强-温度平面中的点的区域。如克莱因所指出的，我们不知道吉布斯是否知道托马斯·安德鲁斯近来(1869年)关于物质的两种流体的连续性的发现，无论是从安德鲁斯本人的论文，还是从麦克斯韦的《热学理论》中。

吉布斯的兴趣在他的第二篇论文中表现得更为明显，这篇论文发

表于几个月之后。尽管论文题目看上去像是前一篇的推广，他显然已经从方法转向了说明。吉布斯所论述的问题是一个物质系统的平衡态的特征，这一状态可以是固态、液态、气态，或是这些相按照情形的组合，并由能量、熵和体积为坐标轴的空间面上的点来代表。这一表面表征着物体的基本热力学方程。吉布斯确立了表面的几何与热力学平衡及其稳定的条件之间的关系。他表明，对于同一物质的彼此处于平衡的两种物相而言，它们不仅具有相同的温度 T 和压强 p，而且它们的内能 $E_k(k=1, 2,)$、熵 $S_k(k=1, 2)$ 和体积 $V_k(k=1, 2)$ 必须满足方程

$$E_2 - E_1 = T(S_2 - S_1) - p(V_2 - V_1)$$

这一方程回答了曾经困扰着麦克斯韦的一个问题，那是在 1871 年 7 月，当时他正在思考安德鲁斯关于液态和气态的连续性的成果。麦克斯韦在写作他的《热学理论》中，就安德鲁斯的图形与詹姆斯·汤姆孙(1822～1892)通信，即我们前面已不止一次提到过的威廉·汤姆孙的兄长。汤姆孙是安德鲁斯在贝尔法斯特时的同事，他提出处于其临界温度以下的液体的等温曲线，因为从气体到液体的转换是可能的(在传统的压强-体积图中)，它确实应表现出一极小值和极大值，而不是平行于体积轴的直线段，如安德鲁斯的数据所表明的。在这两个极值中间，等温线所描绘的状态是不稳定的——因为温度和体积将一起增加——但这样的曲线将能说明超冷和超热的亚稳态，并提供汤姆孙所称的“理论的连续性”。其实汤姆孙提出的这些等温线，看上去非常像乔安妮斯·迪德瑞克·范德瓦尔斯(1837～1923)在他两年后的论文中推导出的曲线。麦克斯韦的问题是：人们必须在那儿画出横穿汤姆孙回线的直线段？或者，用物理学的话来说，决定气体与液体共存于平衡态的那一点的压强的条件是什么？

在他给汤姆孙的信中，麦克斯韦提出了一种回答这一问题的方法，并在他的书中重复了这一方法，论证说对两种物相共存时的压强

而言，必有这两相的内能差为极大。在读过吉布斯的文章以后，他将会改变他的想法。

在分析热力学平衡态的稳定性条件时，吉布斯达到了对于临界点意义的新的理解。临界点不仅表明两种流体相何时成为一种，而且也标志着与两相系统相关的不稳定性的限度。吉布斯的分析也使他得出了一系列临界点必须满足的明晰的条件，从而能描绘出这一点的特性。

正如克莱因所注意到的，吉布斯可以预期他的工作得到广泛的传播，因为它发表于《康涅狄格州艺术和科学院学报》上，自 1858 年以来，吉布斯就是这一科学院的成员。尽管这一科学院不过是中心在纽黑文的一地方性组织，它却诞生于 1799 年，并发展起用《学报》与 170 个其他学术性组织定期交流类似杂志的项目，这些学术组织跨越了从魁北克到墨尔本、从那不勒斯到莫斯科的广大区域。然而，我们知道，他并没有仅依赖于那些潜在的读者，他们不过是在他们自己地方的科学院里会偶然地拿起这份《学报》来：他把自己论文的副本直接寄给了国内外的 75 名科学家。我们不能准确说出这些人中有多少人读了他的这两篇最初的论文，但我们确实知道有一位，而且是关键性的一位，即麦克斯韦是读了。他不仅满怀着热情去读，而且从中获益匪浅。事实上，他在自己的书的第一版中，追随他的朋友泰特，误用了熵这一术语。在从吉布斯的论文中了解了正确定义之后，麦克斯韦在以后的版本中改正了这一错误。

麦克斯韦在几个场合都对他在剑桥的同事谈起吉布斯的论文，并为此给别人写信，竭力加以推荐。他尤其赞赏这一工作中的几何近似，他是如此的着迷于吉布斯第二篇论文中所引入的热力学曲面，以至于竟自己动手做了一个表现水的热力学性质的这种曲面，并把它的一个熟石膏模型送给吉布斯。他甚至在 1875 年版的自己的书中以相当长的篇幅来讨论这一曲面，尽管将此书作为丛书之一出版的出版社对该丛书的描述是“科学的教科书，适用于工匠和学生使用于公共和科学院校”。

1875 年 2 月 18 日在化学学会所作的题为《论物体的分子构造的

动力学根据》的报告中，麦克斯韦说：

> 物质的不同状态的纯热力学关系并不属于我们的学科，因为它们是独立于关于物体的特定理论的。然而，我决不能忘记提到对这一部分热力学的一个最重要的由美国耶鲁学院的吉布斯教授做出的贡献，他给了我们一种十分简单而又完全令人满意的方法，用模型来表示物质不同状态的关系。运用这一模型，那些长期抵制我们努力的问题立刻就可以被解决了。

在这一著名的讲演中，麦克斯韦提出了他自己独创性的方法，证明该在汤姆孙-范德瓦尔斯曲线上的哪儿划水平线(所谓的麦克斯韦法则，按照这一法则，这一线段的上部区域应等于下部)。他对范德瓦尔斯也同样给予了可观的称赞，因为荷兰科学家对于液体连续性的分子说明这一困难问题的攻击“是如此有力和勇敢，不可能不给予分子科学以极大的推动。这也把不止一个研究者的注意力吸引到了低地荷兰语的学习上来，因为它是用这种语言写出的。”

康涅狄格科学院有20名左右的成员，并举行定期的会议。在1874年6月的一次会议上，吉布斯作了一次关于应用热力学原理于热力学平衡的讲话，或许对听众来说，这次讲话并不那么令人振奋，他逐渐把它写成了一篇长篇的专题报告：《论非均匀物质的平衡》。这在他的文集中占了300页篇幅，我们可以引用M.J.克莱因的话来评价它：“在物理科学史上，这确实算得上是一部真正的名家大作”。

在他的专题报告中，吉布斯极大地扩充了热力学所覆盖的领域：事实上，他是用一种简单和统一的方法，来论述化学、弹性、表面张力和电化学等种种现象。描述了作为这一研究基础基本思想的一篇长篇摘要(17页)，发表于《美国科学杂志》上。比起《康涅狄格艺术和科学院学报》来，它确实赢得了更广泛的读者。他的工作的动机在下述语句中得到了清楚的表达：

伴随着发生于孤立的物质系统中的熵的普遍增加，其自然的推论，是当系统的熵达到最大值时，系统将处于平衡态。尽管这一原理并未逃脱物理学家的注意，它的重要性却似乎并没有真正被意识到。很少有人致力于把这一原理发展为一般的热力学平衡理论的基础。

正是吉布斯的专题报告体现出了这种发展。尤其是它简洁准确地表述了平衡的一般标准："对任何孤立系统的平衡而言，必要且充分的是：在所有不改变自身能量的可能变化中，其熵的变化或者消失、或者是负数。"

为了得出这一普遍标准的结论，为了探索它们对于热力学系统的意义(考虑到热力学系统所具有的可变性和复杂性)，吉布斯从一开始就提出了化学势的概念。这些内含变量对处于平衡态的非均匀系统必须是不变的，并起着类似于温度和压强的作用。从这些考虑出发，吉布斯推导出他著名的相律，它限定了一个有着限定数目的化学组元的复相系中独立变量(自由度)的数目。尽管这一相律对于理解大量实验资料而言具有里程碑的意义，吉布斯并没有以任何特殊的方式强调它的重要性。

第一个看出了这一简单而基本的定律的巨大力量的是范德瓦尔斯。正如皮埃尔-莫里斯·迪昂(1861～1916)所评论的，只有范德瓦尔斯才具备这样"卓越的颖悟，能从吉布斯在某种程度上用以隐藏的数学公式中"，察觉出这一相律来。迪昂同时也质疑，有多少像这样的能发育成完整的研究纲领的种子，"由于没有物理学家和化学家能从隐藏它们的代数的外壳下注意到它们，而依然了无结果？"

这表明，吉布斯的专题报告在欧洲已广为人知，并已得到应有的认可。它由 W.奥斯特瓦耳德翻译成了德文，由亨利-路易斯·勒·查特利尔(1850～1936)翻译成了法文。迪昂于 1900 年 5 月 29 日曾写信给吉布斯，认为这一报告标志着 19 世纪成就的顶峰，在很大程

度上就像拉格朗日的《力学分析》标志着18世纪成就的制高点一样。对同一报告的另一评价来自吉布斯的学生埃德温·比德韦尔·威耳孙，他把这一报告中的成就比之于欧拉的第一本书，正是从此书中的知识开始，欧拉发展起了全部其他的知识。

吉布斯简洁抽象的风格和不愿在行文中包括具体的例证和实验应用，使得他的文章非常难读。像亥姆霍茨和普朗克这样著名的科学家都发展起了自己独立形式的热力学方法，却对掩盖在《康涅狄格艺术和科学院学报》中的宝贵资料了无所知。

吉布斯并没有再写出其他重要的热力学著作，而只是就这一长篇专题报告中的几点细节写了几篇短文。或许他认为他已经写出了他就此问题所需要说的话，把注意力转向了物理学和数学中的其他问题（矢量分析、轨道计算、光的电磁理论研究、一种新的力学变分原理、傅里叶级数中著名的吉布斯现象等）。因此，他拒绝了所有建议他再写一篇关于热力学的论文以阐释他的思想，使其更易于为人们所接受的提议。促使他这么做的人之一是瑞利爵士，他于1892年6月5日致信吉布斯，说原初的专题报告“过于浓缩，也过于困难，对于大多数、我应当说对所有读者来说”。吉布斯的回答相当出人意外：他现在认为他的专题报告太长了，这说明在写作时，他缺乏“时间的价值观念，他自己的和他人的时间价值观念”。这些信件，包括上面所引用的迪昂的信，现在都是耶鲁大学图书馆吉布斯藏品的一部分。

直到临去世前不久，吉布斯才同意重新发表他关于热力学的文章。他计划在书中以附加章节的方式，添上一些新的材料。但这样的章节只有光秃秃的两个标题，“论热力学中的简单性”和“论作为混合性的熵”，使我们很想知道其内容，但我们只能猜测了。第一篇论述的可能是我们今天称之为对应状态的定律，第二篇论述的可能是混合过程，如我们下面要讨论的，吉布斯用以来说明孤立系统趋向热力学平衡的倾向。

统计力学为什么通常被归功于吉布斯而不是玻尔兹曼?

当吉布斯发展其对于统计力学的说明时，他致力于热力学的研究和应用的科学生涯已近尾声。在这些研究和应用中，他使用了一些几何表示来阐释抽象的思想，而不是建立在原子论的力学模型基础上的映象。如我们在第一章中谈到，并将在第十一章更详细地讨论的，唯能论者反对甚至藐视分子概念的使用，因而特别看重吉布斯的工作，因为他在自己的工作中避免了这些概念。尤其是黑尔姆，他赞赏吉布斯的热力学工作，因为他“确立了热力学两条定律的严格推论，而不追随或渴求力学”。而吉布斯在他的新书中，讨论的是统计力学的原理。

尽管他经常嘲笑数学家的典型程序，吉布斯本人在运用严格的逻辑和尽力避免发表不完善的成果上，也决不逊色。简而言之，他在研究特性和方式上与玻尔兹曼几乎正相反，后者以他的直觉、他对力学模型的信念和他的热情为取胜之道，其明显的结果是非常大数量的论文和很长的篇幅。关于这一方面，麦克斯韦在几年前(1873 年)曾写信给泰特说：

> 关于玻尔兹曼的研究，我就无法理解他。他因为我的简短而无法理解我，但他的冗长对我来说，也同样是绊脚石。因此，我非常愿意与令人愉快的取代者作伴，并把全部内容放进六行的篇幅中。

的确，麦克斯韦早在玻尔兹曼的论文发表前五年就去世了，但如果麦克斯韦的意见尚且如此，我们就可想见，在那些对物质的原子论更有敌意的时间和地方，对玻尔兹曼的风格和观点会有怎么样的态度。这就是我们先前所称的在平衡态统计力学中，何以玻尔兹曼的论文实际上被忘却，而吉布斯的论文却成为标准的参考书目的一个简易说明。

在一篇讨论玻尔兹曼的论文中，伽拉沃蒂声称：玻尔兹曼的不那么引人注目，不如说是出于这么一个事实，即如前面的章节中提到过的，玻尔兹曼的工作仅仅是通过埃伦菲斯特发表于《数学物理百科全书》中的通俗化文章才为人们所知的，这既是一篇基于统计力学的优秀论文，但也忽略了玻尔兹曼的许多关键的思想。事实上，当人们有机会得以与曾是埃伦菲斯特学生的杰出科学家交谈时就会发现，通过阅读玻尔兹曼和百科全书上的文章，当这些科学家说他们在报告玻尔兹曼的观点时，他们其实说的是那篇通俗文章。在这里，应当提到伽拉沃蒂，不仅因为他似乎是继克莱因之后又一个强调玻尔兹曼的论文的重要性和基础性作用的作者，而且因为他提出了关于 monode（单子）、ergode（因子）、holode（整体）这些词的一种新的词源学说明。尽管这些词现在在通常的使用中都不再出现，却确实有某种相关性，因为其中的第二个词引起了经常使用的形容词“各态历经的”，我们在下面与各态历经相关的问题中将会遇到它。通常推测这些词中的第二个来自希腊文 δδός（路径）。伽拉沃蒂的论点是它来自εἶδος（方面，形式，方法，方式，状态；与梵语中 *vedah* 一词相关）。这是十分有趣的，因为它提出了某种与状态而不是与变化相关的东西，但它仍然有些使人困惑。本书作者必须承认，他本人不具备必需的哲学素养来讨论这一点，尤其是玻尔兹曼为什么在上述德文词汇后面要加上 *ode*，而不是 *ide* 或 *ede*。的确，完美意义上的相关动词εἰδῶν（去看）把 ε 变换成了 o。另一方面，玻尔兹曼应当写作“monhode”，如果他想到与ὁδοός的关系的话[如在“hodogragh”（数学中的“速端曲线”）一词中]。也许我们必须接受伽拉沃蒂的解释，除非我们能提出更有说明力的论证来反驳它。实际上伽拉沃蒂肯定与他的父亲卡罗·伽拉沃蒂(1909～1992)讨论过这一点，他父亲是一位杰出的希腊文学专家，如在致谢中所指出的。

我们尝试性地提出尼耳斯·玻尔所起的作用，为玻尔兹曼的工作不为人们所熟悉加上第三种说明。玻尔或许是本世纪最有影响的

科学家[用马克斯·玻恩在提议爱因斯坦和玻尔两人为格廷根科学院的外籍成员时的话："他对于我们时代的理论和实验研究的影响，要大于其他任何科学家的影响。"]玻尔对吉布斯有着极高的评价，并曾反复地表达，因为他提出了统计系综，但对于玻尔兹曼的评价却不高，这可能导致了一大批的20世纪物理学家怀疑玻尔兹曼的工作。显然，他没有读过发明了前两种系综的玻尔兹曼的研究成果，这一点已为他的合作者L.罗森菲耳德在与T.库恩和J.L.海耳布朗进行的一次关于玻尔的访谈所确证，相关的材料保存在哥本哈根的尼耳斯·玻尔档案馆中。罗森菲耳德与此相关的话是这样的："我认为他没读过玻尔兹曼的作品，至少他全然没有读过玻尔兹曼的论文。但我想他读过，并仔细地研究了玻尔兹曼关于气体理论的讲演。""他说过玻尔兹曼由于坚持力学系统的性质而把事情搞糟了。"

显然，玻尔并不孤立，因为爱因斯坦也曾对他的学生说过："读玻尔兹曼的文章是不容易的。有些伟大的物理学家也无法理解它。"

玻尔的看法要回溯到他的年轻时代，因为他1912年在哥本哈根就热力学的统计基础作讲演时，就已对玻尔兹曼的观点有所保留。

吉布斯的论文

在作为耶鲁大学200年校庆系列中的一卷而发表的他的论文中，吉布斯表明，他最担忧的是他的说明的普遍性程度。因此，他避免对物质的微观结构作任何假设，并拒绝遵循特殊系统的时间变化方程。他给自己定的任务是决定同类系统的系综在可能相中分布的方式，从给定瞬间的分布开始。这样，他的理论就是理性力学的一个分支，一种把后一学科投射到热力学上，一种借助于类比的投射。吉布斯自己讨论了其有效性。

然而，虽然如上所述，吉布斯专心于作为统计力学基础的原理的

普遍性，也正因为此，他的关注不可能过于自由，他还是对玻尔兹曼称赞有加，强调了这一事实：奥地利的科学家首先(开始于 1871 年)清楚地考虑了一个大数系统的相分布，也首先通过刘维尔定理来研究这一分布随时间的变化。

吉布斯的书对于科学共同体而言，肯定实在是一个意外，尤其是因为这看来代表的不仅是作者方向的改变，而是一种现实中的倒转。其实，在引言中，他已说到只有统计力学的原理才能提供“热力学的理性基础”，而后一学科的一般原理只不过是这些更一般的原理的“不完全的表达”。而这也不是他第一次提到分子行为：人们可以说起他论述 NO_2 对于 N_2O_4 的反作用，他在毛细现象的热力学分析中提到的“分子作用球面”，以及著名的吉布斯佯谬，在第五章中所引格拉德的话中曾提及它。

其实，这一佯谬对那些按照统计力学理解熵的真实含义的人来说，也不成其为佯谬。它产生于当两种气体在不变的温度和压强下混合时；此时熵会有所增加，这一点是显然的，因为如我们所知，两种气体的分子密切混合时的状态，要比两种气体完全分开时的状态更可几。熵增的量“独立于这两种气体的相似度或不相似度”，除非它们是同一的——同一种气体——在此情形中，干脆就不会有熵增。吉布斯对这一情形的描述明显是分子式的，我们在这儿能找到以后生长出 1902 年论文的种子。为什么不存在佯谬的理由在于：一个确定的系统不可能只指定惟一的值，它的“熵”。它可以有许多不同的熵，我们可从中依据我们的兴趣、所研究的特殊现象、可获得的或任意决定的精确度，或是所采用的描述方法等来作出选择。例如，一个研究掠过飞行器的空气运动的航空工程师，在思考空气的熵时，会把它考虑为所有分子是同一的，尽管我们知道它是气体的混合，主要是氮气和氧气，它的分子明显是不同的。如果一个核工程师想分离铀的两种同位素，他遇到的会是非常相似的分子，但他需要熵来说明它们之间的微小差异，只有这种方式，才能用以分离这两种同位素的

目的。因此，存在着一个熵的等级结构，它需要愈来愈细的考虑。当分子真正完全一样时，我们只有在头脑里想象给每个贴上一标签，使它们是不同的(按照经典力学)。于是这一高度精细化的熵(吉布斯熵)在时间中将保持不变，因为任何状态在按此熵来量度时，都是同样可几的。这样佯谬就产生了，因为熵不再是系统的一种性质，倒成了我们描述的性质。

他的佯谬所提出的这一例子，必定使吉布斯确信研究统计力学的重要性。事实上他写到："换言之，熵的无补偿减少的不可能性看来被归结为不可几性"，这一句话，玻尔兹曼会把它用作其关于气体理论讲义第二卷扉页上的题词。

到1892年，吉布斯把更多的精力用于写作他这些年来关于统计力学的研究成果。在上面提到过的给瑞利勋爵的信中，他写道：

194

> 现在，我正准备发表一些关于热力学的先验研究，或不如说是关于"统计力学"的成果，对于它，我主要的兴趣在于它对于热力学的应用，亦即麦克斯韦和玻尔兹曼的思想路线。我不知道自己是否有任何本质上特别新的东西，但只要我所选择的立场(在我看来是可能的)能得到问题的一个简单些的观点，我也就心满意足了。

这里，对吉布斯的短文作详尽的说明显然是不适当的。我们将仅限于简略考察他关于趋向平衡态的思想和他的热力学类比。他并未引用玻尔兹曼方程或他的组合方法，或是玻尔兹曼对他的不可逆性观点的最后修饰和澄清。没有证据表明他读过玻尔兹曼关于气体理论的演讲。

为了使吉布斯的下引段落更易于理解，我们回忆起他用"概率指数"这一术语来表示相空间中概率密度的对数 P，我们在第四章中已讨论过它。关于趋于平衡的问题，我们读到[2，第十二章]：

> 因此，我们可以发现一种对系综偏离统计平衡的量度，它超越了最小值之上的平均指数，而这一最小值是与关于相的不变函数的分布不变性条件相一致的。但我们已经看出，概率指数在时间中对系综中每一个系统是不变的。因此，平均指数是不变的，我们发现由此方法是无法处理时间中的统计平衡的。

吉布斯在这里论及一个事实，即在刘维尔定理的层次上，人们无法谈论趋于平衡态的倾向，如果所有与确定能量相容的状态(相)都能在系统的时间变化中达到的话。为了避免这一僵局，吉布斯利用了一个液体的例子，这种液体由两种不易融合且具有不同的黑白二色的成分组成，置于一圆柱形的容器内：当时间为零时，两种液体明显是分开的，但如果我们旋转这一容器，白色和黑色的部分开始描绘出狭窄的色带，绕着纵轴成螺旋状，其宽度随时间减小；液体趋于形成完美的黑白混合，而在任何有限的时间间隔之后，总的体积将细分为由不同颜色编织在一起的两部分。他还试想对一确定系综朝向统计平衡态的趋势给出更精确的说明，想象把它细分为相等的体积元 ΔV，这些体积元假设并非无穷小的，但至少在起始时足够地小，以至于在每一体积元内，概率指数实质上是不变的。于是人们可以看出，由细分相格计算出的平均指数，在随后的时间瞬间中将低于其起始值。这并不违背这方程的时间可逆性。这里，似乎可以作出两点评论：首先，与液体的类似可由下述事实证明，即相空间中的概率密度的表现与不可压缩的液体的密度相似，可作为液体的一个很好的模型(见第四章)；其次，吉布斯这里试图表达的会聚于平衡态的想法与数学中的弱收敛概念是近似的。

为了找到热力学的分析力学基础，吉布斯接着研究存在于支配统计系综的方程与热力学的普遍原理之间的一致之处[2，第十四章]，但是，他说：

不管这种一致会是多么有趣和重要，我们距说明关于这些定律的自然现象仍然还很远。因为与自然情形相比，我们所考虑的系统具有一种理想的简单性。尽管我们不过是假设我们考虑的是有着有限数目自由度的保守系统，但就所涉及的自然物体而言，我们所假设的还是太多了。在任何完备的热力学系统中都确实不应忽略的辐射热现象，与原子的结合相联系的电现象，似乎都表明，假设有限数目的自由度系统，对于说明物体的性质是不充分的[……]。然而，尽管这些早已为物理学家所认识[见玻尔兹曼，《维也纳科学院通报》，第63卷，第418页(1871年)]的困难，在科学发展的目前阶段，使我们无法对在自然中呈现给我们的热力学现象给予满意的说明，有限数目的自由度系统的理想情形仍然是一个并不缺乏理论兴趣的论题，可用于指出自然呈现给我们的更困难问题的解决途径。而如果这种系统的统计性质的研究，给出了在极限情形下采取已接受的热力学定律形式的某一定律的精确表示，它的兴趣就会更高。

吉布斯还说到，正则系综概念本身“对于论题的自然说明看来可能是不自然的和不贴切的”。然而，如果我们取温度为独立变量，那么正则系综就给出了处于确定温度时一个物体的最好的数学表征，而当能量被考虑为独立变量(力学中的一个自然的见解)时，自然应求助于微正则系综。

法国科学家关于统计力学的工作

我们注意到，哈达马德于1906年对吉布斯的论文作了分析，尤其关注了在统计力学中说明不可逆性的可能性。

哈达马德回想起分析力学中的方程，一般地说，即所谓的泊松稳定性，依此，系统的表征点无穷多次地通过它所占据处任意小的

邻近点，除非一零体积集(彭加勒复现定理，见第五章)。他对比了玻尔兹曼和吉布斯的分析，前者基于可能发生于非常短时间间隔内的多次碰撞事件，而后者考虑的是没有相互作用的系统，且只适用于对相空间中两表征点足够长的时间间隔 $t-t_0$，结束于距 t 很远的 t_0。在哈达马德看来，这一事实是确定无疑的：立足于运动方程的可逆性的批评意见是站不住脚的，即它不能被用于证明不可逆性定律的不可能性，相反，如哈达马德基于纸牌中洗牌的类比所表明的，不可逆性定律似乎是可能的。哈达马德自己强调了解对于初始数据的敏感性。

照哈达马德看来，吉布斯并没能严格证明可逆性过程的存在，因为缺乏对于系统随机性的令人满意的定义。人们可以认为“有组织的”分布在彭加勒的复现定理的意义上，是一种例外。他的结论如下：

> *如果 H 是系统 S 的某一具有下述性质的分布函数：H 正在增加可以被转变为这种陈述(在其中不再有把柄为可逆性反对)，设 H_1 和 $H_2<H_1$ 为 H 的两个值，T 为一适当选取的时间间隔。让我们用 M_1 表示在时间间隔 T 中，量 H 至少取一次 H_1 值的运动；用 M_2 表示(在同样时间间隔中)H 至少取一次 H_2 的运动；用 M_3 表示满足前面两个条件的运动；换言之，与 M_1 和 M_2 同时的运动。M_3 在 M_1 中是例外的，而在 M_2 中却不是。就我而言，在吉布斯和玻尔兹曼的推演之后，我不怀疑这一类的陈述；如果他们的结论是错误的，就只会错在关于量 H 的表示上。*

197

另一位伟大的法国数学家亨利·彭加勒不止一次就气体分子运动论表示过他的见解，但如我们在第五章中所见，更多的是对于玻尔兹曼和吉布斯思想的怀疑，而不是对他们的赞成。关于彭加勒和玻尔兹曼，具有讽刺意味的是他们彼此并不认识；他们或许是对于我们有

关复杂经典系统行为的思想影响最大的两位科学家。我们没有他们相会的直接证据，但他们肯定应会过面，因为他们都出席了1904年在圣路易斯举行的会议(见第一章)。

这里，我们回忆起彭加勒在法国科学院面前所致的(其实过于匆忙的)赞辞：

> 悲惨谢世的玻尔兹曼长期教学于维也纳；他尤其因为其关于气体分子运动论的研究而著称于世。如果这一世界服从于允许我们在时间中既可向前，也可往后的力学定律，为什么它总是始终如一地向前，而不给人以向后的任何机会呢？这就是他所致力于解决的问题，而且并非全无进展。

在同年发表的他所写的一篇文章中，我们读到：

> 气体分子运动论对于那些习惯于数学的严格性的人们来说，仍然留下了一些有待澄清的为难之处；一些尚未足够准确的结果，表现出一种悖谬的形式，并产生了一些从另一方面说仅仅是表观上的矛盾。因此，依我之见，克分子排序和分子排序看来都未能足够准确地定义。我认为，最使我们挠头的为难之处如下：我们必须证明熵减少(作者注：所选符号与玻尔兹曼的 H 函数一致)；但吉布斯的论证似乎假设了在让外部条件变化后，人们等待着让系统回到(稳态的)体制，在让它们重新变化之前。这一假设是根本的，否则人们就会通过让外部条件变化得如此之快，使稳态无法占据优势，而得出与卡诺原理相矛盾的结论。我想澄清这一问题。

彭加勒继续他的分析，并在讨论中得出一个粗加工的熵，和一个精加工的熵。后者大于前者，是一个为物理学家所考虑的量随时间

而减少，而前者却保持不变。

趋向平衡问题与各态历经理论

看来，彭加勒的分析，显然激发了埃伦菲斯特对于吉布斯的批评，即他从未以一种精致的方式，澄清两种熵之间的区别。尽管这一批评是中肯的，但人们不应忽略吉布斯本人是知道这一困难的，如下述涉及一种包含有色物质的液体运动的语句所表明的：

> 现在，这种有色物质的状态由其密度平方平均的最小值来表征：这是一种密度均匀的，即完全混合的状态；是一种有色物质的空间分布不为其内部运动所影响的平衡态。然而，让我们假设有色物质随一种可变的密度分布。如果我们给液体无论何种不可压缩的流体动力学的运动——它可能是一种稳态的流动，或也可能随时间而变化——则液体任意一点的有色物质密度是不变的，因此这一密度的平方平均将是不变的。而对于我们来说，也没有比这更为熟悉的事实：即扰动总倾向于把液体带向均匀的混合态，或是其组分的均匀密度，而这正是由这些密度的平均平方的最小值来描述的。确实，在物理实验中，扩散过程加速了这一结果，但这一结果显然并不依赖于这一过程。
>
> 矛盾可以追溯到有色物质的密度定义，以及估价这一量的过程。这个量为空间单元中的有色物质的量与单元体积的极限比值。现在，在任意量的扰动后，我们把我们的体积元当作为同样部分的液体(它们起初占据的是任何确定的体积元系统)所占据的空间，这样推算而得的有色物质的密度，将与原初为确定的体积元系统所决定的密度相等。此外，如果在任何有限量的扰动结束时，我们取体积元为通常的、然而足够的小的形式，为这体积元所决定的有色物质密度的平均平方，将以任意需要的精确度

近似于其扰动前的值。但如果我们取任何确定位置和尺寸的空间元，我们可以继续扰动，直至对这些确定的空间元，有色物质的密度都趋于一均匀的极限，即一种完全混合的极限。

显然，这一例子属于这么一种情形，其中极限的极限有不同的值，依据我们求极值过程的顺序而不同。

这么长的一段论述说明了什么？从根本上说就是这一点：如果我们把相空间（或更准确地说，恒定能量的超曲面）细分为小的相格 Δ，并以 $\bar{P}^i(t)$ 表示 P 对这些相格之一的平均（一个指标为 i 的函数，确定时间 t 时的这一相格），那么当时间 $t\to\infty$ 时，$\bar{P}^i(t)$ 趋于一常数（独立于 i）。这一陈述是可能的，至少对于未表现出吸引力的点系统而言，但证明起来就远不那么简单了。用数学语言来说，我们应说存在着一个朝向均匀态的弱收敛。

其实，上述结果从今天的理解来看要强于各态历经性。这里，回顾一下历史和这一概念在统计力学发展中的作用，似乎正逢其时。

我们已经说过，当我们说如果对力学的统计方法成立，必须满足一个性质时，这是一种讽刺。尤其是由于一种严格的平衡是不可能的，热力学平衡的类比是一种并不有利于任何相空间区域，或至少是恒定能量超表面区域的运动。

从历史的角度讲，埃伦菲斯特的文章留下了太多令人想做的东西。不仅对于玻尔兹曼在确立平衡分布中所起的作用上是这样，而且也由于某些错误的归因。例如，布拉什注意到作者把“路径的连续”归功于了麦克斯韦，而其实它是由 J. H. 琼斯于 1902 年，即麦克斯韦去世 23 年后首次使用的。

因此，最好还是来看看作为奠基者的麦克斯韦和玻尔兹曼是怎么做的。后者于 1871 年首次发表了关于各态历经系统的详细讨论。他论述了平面中的一个质点，在沿 x 轴的力 $-ax$ 与沿 y 轴的第二个

力 $-by$ 之和所产生的吸引力作用下的运动。如果两个常数 a 和 b 之间的比率为有理的，则所产生的轨迹将是闭合的。在这种情形下，人们得到基础物理学教科书中著名的所谓利萨如图形。当上述比率为非有理的，则精确的复现将只对某些特殊的初始值才发生。一般而言，$x-y$ 平面上的运动中将趋于占据一长方形，其大小为初始值所确定(见图 7.1)。类似地，在一中心引力的情形中，对那些只允许有界运动的总能量值(玻尔兹曼引证一个势场 $ar^{-1}+br^{-2}$ 为例，对它可有精确解)，质点横穿整个环状区域的表面(见图 7.2)，而其轨迹一般是决不会闭合的(除了一些特殊的初始值外，其显著的例外是牛顿力和与引力点的距离成正比的力)。由于玻尔兹曼把这些简单的问题作为确立平衡态统计力学所需要的性质的例子来进行研究，因此令人饶有兴致的是，可以看一看他到底是什么意思：他真的是想说轨迹通过了所说到的区域中的每一点，还是说它以一种能任意地接近每一点的方式，覆盖这个区域？这就是问题所在。玻尔兹曼接着说，所讨论的同一性质对 n 个点的系统也成立。在文章的后一部分，他基于下述假设，讨论了气体分子的热平衡：

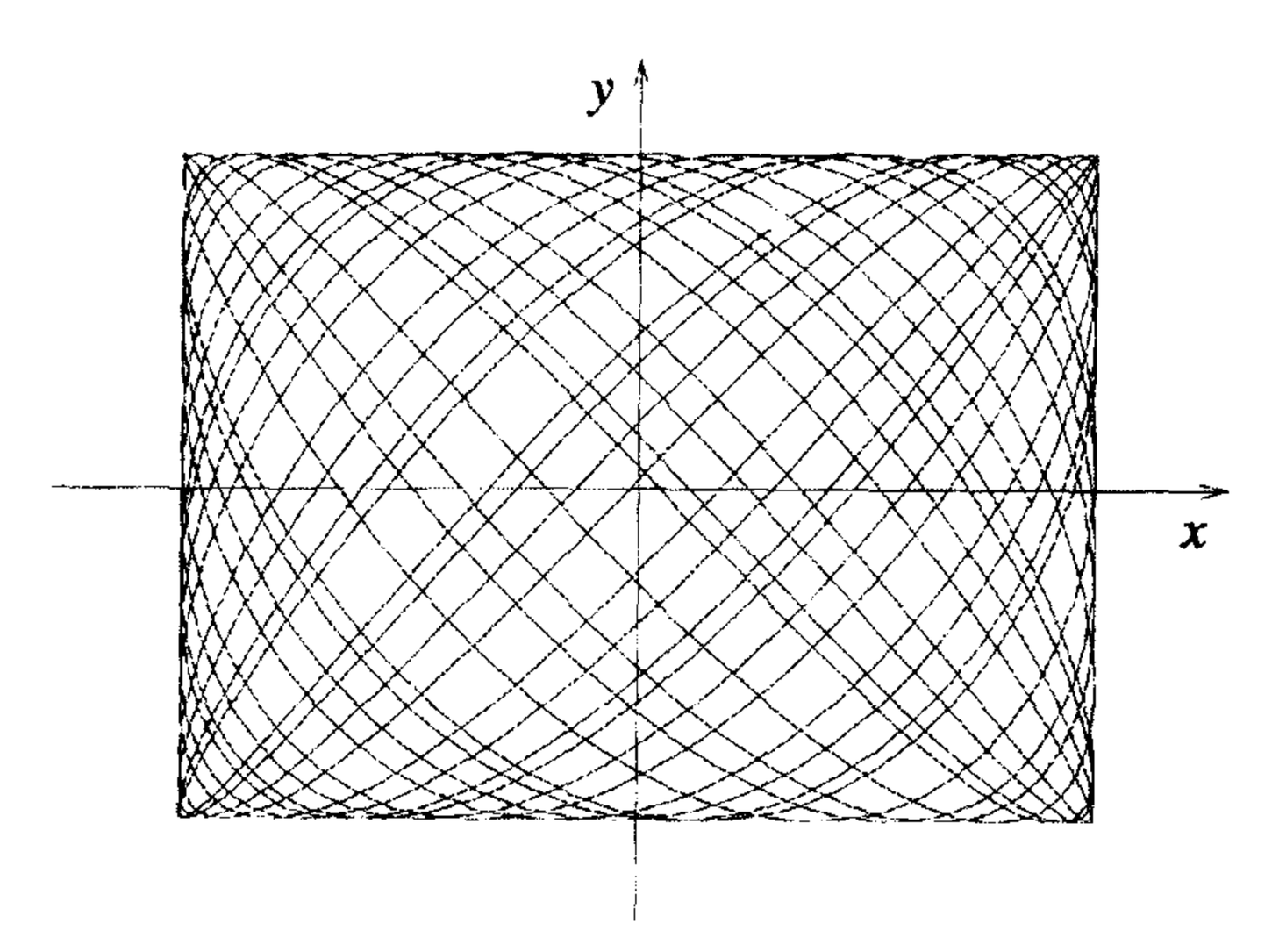


图 7.1　一个在沿 x 轴的力 $-ax$ 和沿 y 轴的第二个力 $-by$ 作用下的质点的运动轨迹。

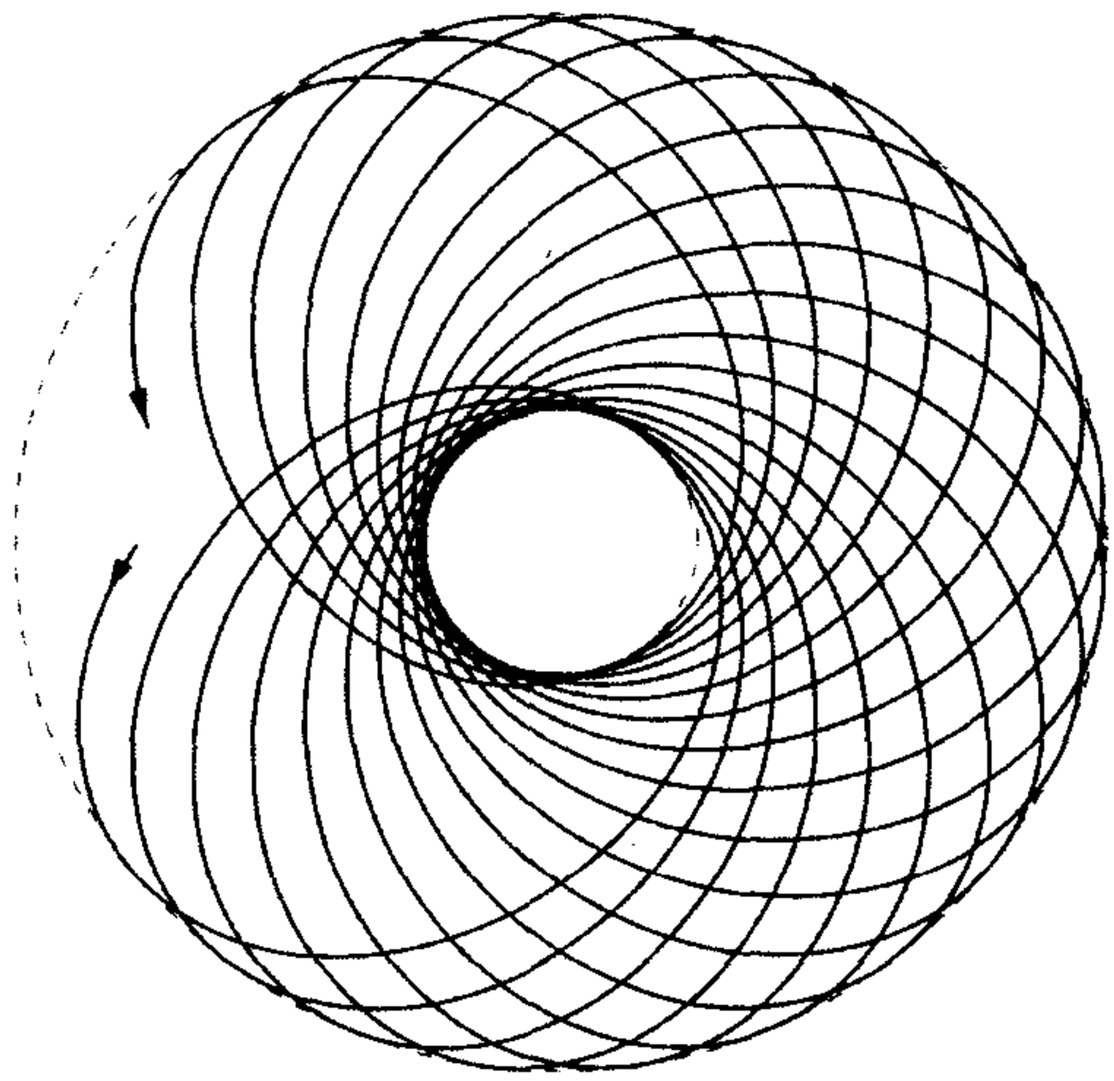


图 7.2 一个受稍许不同于牛顿引力的中心引力作用的质点的轨迹。

热运动的极不规则性，以及从外部作用于物体上的各种力，使得原子(由于有我们称之为热的运动)能通过所有与能量守恒相容的可能位置和速度，相应地，我们可能应用前面所建立的方程于热物体中原子的坐标和速度。

玻尔兹曼提到外部作用力这一事实，似乎表明他知道轨迹不会经过每一点，但只要它任意地接近每一点，这就无关紧要了，因为我们无法说明很小的外力的多重性。

或许如通常所说，有利于各态历经假说的最有力的表述，可以从麦克斯韦那儿读到：

对平衡态分布函数表达式的直接证明，其所需的惟一假设是：如果让系统自己处于它实际的运动状态，它迟早会通过与能量方程相一致的每个相。

显然，在有些情形中这不会发生。不为外力作用的系统除

了能量方程外，有六个方程，因此这一系统不可能经过这些相，因为尽管这些相满足能量方程，却并不满足这六个方程。

另外，会有一些特殊的力的定律，例如按照这种定律，两点之间的张力与它们之间的距离成正比，对它而言，整个运动在有限的时间后将重复自身。在这种情形中，一个变量的特殊值对应于其他变量中每一个的一个特殊值，这样由那些不对应的变量的数值集合形成的相就不会出现，尽管它们可能满足几个一般的方程。

但如果我们假设物质粒子，或其中的一些，偶尔遇到一固定的障碍，例如存放这些粒子的容器的器壁，那么除了一些特殊形式的障碍表面外，每次碰撞会对系统的运动产生一个扰动，从而从一个未受干扰的路径变到另一路径上去。这两种路径必然都满足能量方程，且它们必然相交于满足与固定障碍相碰条件的相，但它们不服从动量方程。在这种极端复杂的情形中，很难达到一个完全满意的结论，但我们有相当的信心断言，除了特殊形式的固定障碍的表面外，在足够数目的碰撞后，这一系统早晚会通过与能量方程相容的相。

这一陈述看来是不可避免的，因为边界没有引进任何不可控制的外界影响。每一相这个词不等于每一点，而把此词用作论证的基础，确实是过分在文字细节上下功夫了。因此，麦克斯韦实际上说出了与各态历经假说类似的东西，而玻尔兹曼则并不总是非常准确的(布拉什给出了另一个例子)，这不过是因为玻尔兹曼认为，一个准各态历经假说与一个各态历经假说尽管数学上非常不同，实际上是等价的。

我们注意到，在前面说到的布拉什关于各态历经假说的长篇大论且资料极其丰富的讨论中，提到了玻尔兹曼在吉布斯之前就已发现了系综方法，但他却没能去讨论这一极端重要的方法。

为总结关于各态历经假说的讨论，我们必须回忆起无穷集理论在

当时还未细致地发展起来。但所需要的只是允许时间流逝。这样，如果我们称那些相空间的轨迹通过每一点的系统为各态历经系统，读到博雷尔在他对埃伦菲斯特文章的法译本的补充中的下述评论，就毫不奇怪了：

> 要确定甚至各态历经系统的定义也是矛盾的，只要熟悉现代集合论就足够了……这一矛盾已为A.罗森塔耳和M.普朗谢利耳明确地证明……说实话，这个抽象的假说似乎并没有真正为物理学家所思考过……

今天，由于G.D.伯克霍夫和J.冯·诺伊曼的工作，各态历经一词等价于“度规不可分解性”。这意味着动力学系统有着一个相空间，它不拥有任何对运动不变的非零测度子集。换言之，不能为轨迹相连接的点的集合有零测度。看来很可能许多物理学感兴趣的系统都有此性质，只是缺乏实际的证明。

普朗克与统计力学

正如我们已经注意到的，吉布斯的论文趋于遮掩玻尔兹曼和麦克斯韦的分子运动论，并引发了一种忘却玻尔兹曼就热力学第二定律给我们的教益的倾向，尽管吉布斯本人最终将其读者的注意吸引到了他的热力学类比的偶然本性上。因此，令人感兴趣的是考察马克斯·普朗克在这些岁月中做了些什么。他是一位信仰改变者，如果说在1897年，他还在自己关于热力学的论文引言中说挡在分子运动论前进道路上的“障碍目前是无法克服的”，并提到“热力学基本原理的力学解释中的……根本上的困难”。

普朗克的改宗是由于这一事实，即玻尔兹曼的技巧在普朗克本人于1900年提出光量子理论的基本思想中起到了很大的作用(见第十二章)。

给玻尔兹曼以一个有利的位置的机会来自于他的60诞辰庆典。普朗克注意到，尽管温度一度曾是最令人感兴趣的量，因为它是直接可测量的，而熵看来是复杂的概念，但这一情形却被颠倒了：人们必须给熵以力学的说明，而温度的定义则循之而出。这一反转了的趋势，其理由在普朗克看来是十分清楚的：温度是一个本质上与热平衡相关联的概念，而热平衡则只有相对于不可逆性才获得其意义，是不可逆性所趋向的最后阶段。因此温度的概念必然导致不可逆性的研究，从而导致对熵这一原初的、普遍的概念的研究，因为熵的概念适用于所有状态，适用于所有状态变化，而温度则仅出现于热平衡，即熵达到其极大值的条件下。于是，他继续赞扬玻尔兹曼，但像其他每个人一样，却忽略了后者1884年的论文：

> 看来克劳修斯和麦克斯韦从未尝试用力学术语给熵以一个直接和普遍的定义。这一步要留待玻尔兹曼来完成，而他是从气体分子运动论和以普遍和单义的方式把熵定义为力学状态的概率的对数出发的。在他关于统计力学的论文中，J.W.吉布斯在玻尔兹曼的定义之外，提出了三种基于概率演算的定义。吉布斯的定义追求的是广泛的普遍性，因为它们不蕴含关于所考虑力学系统的任何特殊假设。它们原则上允许成功地推广到那些有、或是没有大数目的自由度的系统，推广到由相同、或是不同性质的成分组成的系统。对应于这些熵的定义中的每一个，通过 $dQ = TdS$ 这一公式，都有着一个温度的定义。对于大数目自由度的系统，如吉布斯所表明的，这三个定义总是引出同样的结果，因此，对一个由许多分子形成的系统，只有一个与热力学相一致的定义。

普朗克于是继续考察单原子气体中的平衡情形，并注意到玻尔兹曼和吉布斯的定义都是与热力学一致的：

鉴于玻尔兹曼以概率的对数来定义熵，按吉布斯的第一种定义(涉及正则系综)，熵是带有负号的概率对数的平均值。在不可逆过程中，按照吉布斯，概率的平均对数是减少的，而按照玻尔兹曼，概率的对数是增加的。然而，这一矛盾仅仅是表观的，当人们考虑到两人用概率这一词语，表达了完全不同的概念这一事实时，矛盾就消失了。这需要更详尽的思考。玻尔兹曼通过区分系统的确定态和系统自身的“配容”，获得了概率的表达式。状态由位置和速度的配分定律所定，即由位于相空间的每一体积元中的粒子数来定，假设认作相等的每一体积元中总是有着大量的粒子。因此，一个确定的状态对应于许多配容。其实，当属于两个不同体积元的粒子互换其坐标时，就得到新的配容，但状态保持不变。这样，如果我们与玻尔兹曼一样，认为所有的配容是同等可几的，对应于确定状态的配容数就给出了所考虑状态中的系统的概率，及这一状态下系统的熵。

相反，如果我们与吉布斯一样，就会认为在熵的确定中，粒子均匀性的问题并不比位置和速度的分布占据更重要的地位。这里要考虑的，不如说是当人们思考在所指定条件中所有可能的坐标和速度的值时，所获得的配容数：坐标值必须在所考虑的体积内，而速度则可为特殊的条件所限制。

尽管关于玻尔兹曼对熵的计算，普朗克提到了关于气体理论的讲演，但他以更大的精力投入吉布斯所给出的定义的研究，并表明当分子数目很大时，这三个定义是一致的。然后，他考虑了当粒子不同一时的更一般的情形，注意到玻尔兹曼的定义提供了与热力学一致的公式，而吉布斯则只有引入巨正则系综时，才能达到这种一致。他同时注意到，不同于吉布斯，玻尔兹曼的论述可以推广到非平衡态。

第八章

多原子分子问题

比热问题

从一开始，多原子分子就在分子运动论中造成了与热容量(或比热)相关的问题。让我们直接来读一读玻尔兹曼本人的话：

> 关于气体的两种特殊比热比率的独特分子理论，今日又重新恢复了其重要的作用。对于其分子行为像弹性球的最简单气体，克劳修斯曾计算出比率的值为 $1\frac{2}{3}$，结果它不适合于任何当时已知的气体，他由此推断没有构造如此简单的气体。对于其表现像非圆弹性物体的分子情形，麦克斯韦得出了 $1\frac{1}{3}$ 的值。由于对最了解的气体其比率为 1.4，麦克斯韦也放弃了他的理

论。但他忽略了其中分子关于一个轴对称的情形，在此情形中，理论的要求恰好是如上所述的 1.4。

孔特和瓦尔堡对水银蒸汽得出了克劳修斯的旧值 $1\frac{2}{3}$，但由于实验十分困难，再也未能重复，结果只能被遗忘了。其后，同样的值再次出现，这次是对于所有为瑞利勋爵和拉姆赛所新近发现的气体的比热的比值，且所有其他情形都指向为理论所需要的特别简单的结构，如对于水银蒸汽的情形一样。如果麦克斯韦没有犯此轻微的错误，或者如果早在克劳修斯那个时代就认识到这些新的气体，这对于气体理论的历史将会有着怎样的影响啊！从一开始，人们就会在最简单的气体中，发现理论上所需要的比热的比值。

对于这一对比热的分子运动论早期问题的描述，我们没什么可补充的。实际上正是玻尔兹曼本人，发现了这一麦克斯韦所犯的轻微的错误。

如果比热问题的解决，起初是随着稀有气体的发现，随着对单原子气体重新考虑旧的关于水银蒸汽的实验，以及玻尔兹曼所提议的把双原子分子看作具有五个自由度，那么对更复杂的分子，问题在以后就会重新出现，并表现为经典力学未能解决的问题之一。在重提这一问题之前，让我们首先考察分子运动论很快就会遇到的另一个困难，我们在第五章中，已经提到过它。

多原子分子的 H 定理

当玻尔兹曼写出他的方程时，他把多原子分子气体的情形也包括在内。在他的这篇论文(约长达 100 页)行文至三分之一处时，他在一节的中间，还专门就将 H 定理推广到这一情形的重要性作了评论，而

在同一篇论文的最后，他又回到了这一点上来。事实上，尽管玻尔兹曼写出的方程是正确的，他起初对于把 H 定理应用于这一情形的证明却并非一般的，如为 H. A. 洛伦兹于 1887 年所首次指出的。

一封日期为 1886 年 12 月 11 日的玻尔兹曼所写的信件表明，洛伦兹的第一篇论文曾以手稿的形式与玻尔兹曼交流，其基本思想如下：当人们对单原子气体证明 H 定理时，他们通常并没有充分地强调(因为这与最终结果无关)速度 ξ' 和 ξ'_* 不是经碰撞由速度 ξ 和 ξ_* 变换而来的速度，而是经碰撞变换为后者的速度，事实上相关性的缺乏适用于碰撞前的速度，而不是同一碰撞后的速度(见第四章)。如果我们回忆起描述碰撞的参量为单位矢量 n，其指向为 $x_* - x$，则可证明在获得项中 ξ 和 $(\xi'_* - \xi')n<0$ 和 $(\xi_* - \xi)n>0$，而在损失项中，符号刚好相反。在迄今所考虑的单原子气体中，其可利用之处在于 ξ'_* 和 ξ' 的表示对于 n 的符号变化是不变的，这使得人们可以等价地论及两种概念上不同的东西：(1)一对由速度对 (ξ_*, ξ) 的碰撞而产生的速度；(2)一对在碰撞中产生了速度对 (ξ_*, ξ) 的速度。我们刚才回顾的这种值得注意的现象是与对心碰撞的对称性相关的，因此对于碰撞 $[\xi_*, \xi] \to [\xi'_*, \xi']$ 人们可以一个“反向碰撞” $[\xi'_*, \xi'] \to [\xi_*, \xi]$ 与之相联系，其与前者的区别仅在于沿分子中心连线方向的单位矢量 n 变为 $-n$。而在多原子分子情形中，描述碰撞前后状态的将不再仅仅是中心的速度，而要有更多的变量(例如，有这些速度，分子表现为具有六个自由度的刚体时，具有角速度)。我们用符号 $[A, B]$ 来表示分子对的状态。此时人们没有理由把 $[A, B] \to [A', B']$ 与一个相反的碰撞 $[A', B'] \to [A, B]$ 相联系，其中的区别仅在于从 n 到 $-n$。在玻尔兹曼最初的论文中，对多原子分子证明 H 定理时，通过与单原子分子情形作类比，他提出一个隐含的假设，即这么一种相反的碰撞总是存在的。而洛伦兹注意到，这种情形并不具有一般的有效性，从而提出这一定理的限定性说法，即它只适用于在所有速度的符号都变

化而状态保持不变时。玻尔兹曼很爽快地承认了自己的错误，并感谢了洛伦兹的关注，他说："我极其高兴地从你那儿发现了一位致力于发展我的关于气体分子运动论的思想的人。在德国，实际上没有人能同样地理解这些事情。"同一年(1887 年)，当洛伦兹的论文发表时，玻尔兹曼见到的是一个基于所谓的"闭合的碰撞循环"2，5，6的"修正了的"版本，初始状态[A，B]不是通过单一的碰撞，而是通过一连串的碰撞达到的。这一假设尽管不容置疑地为洛伦兹和玻尔兹曼所相信，却并不能真正使任何人满意。其实，其初始形式论述的是一有限数目的碰撞循环，而如洛伦兹在 1887 年 1 月 8 日信中所指出的，可能需要无穷多的碰撞才能回到初始状态。玻尔兹曼在他 1887 年的论文中证明了无穷系列，但比之于他对于有限数目碰撞情形的证明，这显然是很难以令人信服的。

这一方面的问题一度为人们所忘却，直到借助于量子力学方法，所需证明的性质随着用于描述量子力学中碰撞现象的散射矩阵的幺正性质才得以证明。用纯经典方法，对于多原子分子情形给出所需性质的满意证明，直到相当新近的日子里才完成，但这似乎已不在关于分子运动论的史学家的关注视野之内了。

然而，经典的和量子的这两种论证，都体现了玻尔兹曼的闭合循环论证的最具特色的方面，即人们必须把几次(其实是无穷多的)碰撞结合在一起来考虑。

再论比热

现在，让我们回到比热问题，它应当是一个关于平衡态的问题，因此是较容易解决的。典型的困难来自于不可能使用能量均分定理。如果我们接受气体处于具有麦克斯韦-玻尔兹曼分布的平衡态的思想，那么在不为外力作用下，出现在多原子分子总能量(动能 + 势能)表式中的每一个二次项(在速度或坐标中)，对每个分子的热能都

将贡献一个$\frac{1}{2}KT$的项(与通常一样，这里K为玻尔兹曼常数，而T为绝对温度)；因此分子的热能将为$\frac{1}{2}\gamma KT$,其中γ为上面所述项的数目。在此计算中，人们必须只考虑在碰撞中彼此耦合的项，即实际上可交换能量的项。否则，即使在平滑坚硬的球的情形中(一种典型的单原子气体模型)，人们也应考虑关于旋转运动能的项，而这是不能变换为其他任何形式的能量的。这样，对前面讨论过的形状像一个硬棒似的双原子分子，人们忽略掉关于两原子连线为轴的旋转运动能，必然取$\gamma = 5$，而不是$\gamma = 6$。显然，在棒是完全坚硬的和稍许弹性的之间，人们会发现一种不连续的表现，因为在第二种情形中，两个原子间的距离会有所改变，分子因而至少得到一个额外的振动自由度，其结果是气体的热能从$\frac{5}{2}KT$突然变为$3KT$。如经典力学中的许多其他问题一样，这一问题通常也认为已被量子力学所解决。实际上，普朗克分布是允许振动频率在能量分布中起着一种基础的作用的，它容许逐渐解除对振动自由度的限制，这样，就与我们的经验相一致，重建了温度变化时的比热表现的连续性。

然而，这一问题也以另一种形式表现出来：为什么在量子力学的处理中，我们不考虑其他的自由度，例如电子的自由度，或是原子核中不同成分的自由度呢？答案是这些快自由度是与慢自由度脱耦的，因而它们的能量在与宏观观察相关的时间间隔中无法交换。而这也正是玻尔兹曼对于相对应的经典物理中自由度冻结问题的回答：

> 但是气体的分子如何能表现得像刚体一样呢？它们不是由更小的原子组成的吗？或许它们是，但它们内部振动的活力转换为逐渐的和旋转的运动是如此缓慢，当气体被置于低温时，分子可以保持数天甚至数年的运动，它们内部振动较高的活力对应于初始温度。事实上，能量的这种迁移是如此缓慢，在周围物

体的温度涨落中，它们不会被觉察到。

在上面所引段落之前，玻尔兹曼注意到了由黑体辐射中不同频率之间的能量分布中所表现出来的问题：

> 这些振动所依赖的以太的广义坐标，并没有与决定分子位置的坐标相同的活力，因为整个以太并没有时间与气体分子一起进入热平衡，也全然不会达到它本应能达到的状态，如果它与气体分子一起，被封闭在同样的容器中无穷长时间的话。

换言之，玻尔兹曼认为热力学中所研究的某些平衡态，事实上不过是假设为平衡态，尽管它们不是，因为变化的时间比之于我们观察的时间是极其巨大的。如我们所见，这实际上也是他关于策梅罗佯谬的态度；为彭加勒定理所预言的复现将在一不可想象的长时间之后发生。在他的《气体理论讲义》第二卷的第45节，可以读到类似的语句：

> 如果分子是中点对称的物质球，那么当然它们不可能由碰撞而推动进入旋转，同样也不可能失去它们初始的旋转。然而，这样的分子不可能永久地保持没有旋转，或是它们不可能总被知觉为同样的旋转量。看来更可能的是它们只有以非常的近似拥有这种性质，因此，它们的旋转状态在确定比热的时间内不会有可察觉的变化，即使经过一个很长的时间周期，旋转将与其他的分子运动相平衡，这一过程是如此慢，以至于这样的能量交换能不为我们所观察到。
>
> 类似地，人们能假设在 $k = 1.4$ 的气体中，分子的构成要素绝非如绝对不可变形的物体那样联结在一起，而是说这种联结在观察的时间中是如此的密切，这些构成要素彼此间没有显而易见的运动……

玻尔兹曼关于比热的思想与20世纪的贡献

詹姆斯·琼斯(1877～1946)非常认真地思考了玻尔兹曼关于比热的观点，这激发他去详尽地讨论黑体辐射问题。而在没有普朗克的光量子假说的情况下，按经典方法，这一问题将导致用瑞利和琼斯的名字命名的分布定律。下文所引的即为琼斯的几段话：

> 当然，我知道普朗克定律与实验相符，如果确定 h 为一不为零的值的话；而我自己的定律得自于使 $h=0$，可能与实验不符。但这不会改变我的信念，即 $h=0$ 是惟一可能取的值，我的看法是在实验条件下的短波长以太激发情形中，设想以太的能量与物质的能量平衡是完全错误的。

> 我们可能会说，在 $3N$ 个物质自由度和以太(n 个自由度)中的 s 个(低频)自由度之间的能量转换是比较快速的，而对剩余的 $n-s$ 个自由度的转换则是非常慢的。对于一极长的时间而言，这 $n-s$ 个自由度将不会得到它们应分有的那份能量，而能量将很快地在其余的 $3N+s$ 个自由度中均分。此时，以太与物质系统的能量比为 $s/(3N)$，而一般而言，这是一个非常小的数值。

> 落在一块刚硬的钢板上的钢球在其能量明显地减少之前，大约要反弹6次左右。如果气体分子运动论是正确的，系统的分子在其总能量明显地减少之前，肯定要在彼此之间和与刚硬的容器壁之间反弹千百万次。本文旨在证明，就目前可获取以用于判断的资料来看，分子拥有充分的弹性以使其发生。

> 接着，引入了一个其内部振动由频率为 p 的谐(等时)振子描述

的分子模型，他考虑后发现，在一次碰撞后，分子所获得的振动能正比于 $\exp(-2ap)$，其中有一常数 a，并补充说：

> 在这一例子中，适当的时间单位当然是 a。如果在这些单位中，p 的值为 200，我们看到分子的弹性中引入了一个因子 e^{-400}……这意味着如果分子都以平均速度运动，耗散一确定部分能量所需的碰撞次数，将以对“弹性”的 $e^{400}:1$ 的比例而增加。换言之，“弹性”可以轻易地造成能量的耗散是在几分之一秒中还是需千百万年的差别。

这一类的思考在量子力学的急剧进展中，当然很快消失了，但 L. 朗道和 E. 泰勒又重新发现了它们。直到几年以前，人们会以一种猜测的或启发式的观点来讨论问题的这一方面。但近来，多亏分析力学中严密数学方法的进步和有力的数字模拟仪器的运用，人们可以作进一步的工作。事实上，现在我们已经知道，在非常一般的条件下，如果两个子系统有一个量级为 ε 的相互作用能，两个子系统的能量交换将为指数为 $1/\varepsilon$ 形式的很小值，由此，如果 ε 足够小的话，现象看来实际上是稳定的。例如一个双原子分子的振动能与其平动能平衡所需要的时间 T，其估算公式为 $T = \tau e \alpha \upsilon$，其中 υ 是振动的特征频率，τ 和 α 是具有时间量纲的常数，依赖于相互作用势的参量。对这些参量引入其典型值，可得出 τ 和 α 都为 10^{-13} 秒的数量级。这意味着在所说数量级的微观时间 τ 中，低频可以达到一平衡态；某一（量级为 10^{-13} 秒的）的 υ 会在 1 秒的时间内达到平衡；而频率为 2υ 的则需要 10^{13} 秒，即 10^5 年达到平衡，而频率 3υ 则需要 10^{26} 秒，即 10^{18} 年才能达到，如此等等。

这一类的成果在现代哈密顿动力学系统理论中可以找到其位置，这种现代理论植根于 20 世纪 50 年代中期科尔莫戈洛夫所从事的理论层次的研究，和费米、帕斯塔和乌拉姆等人的计算工作。科尔莫戈

洛夫发现了一种避免著名的彭加勒定理的某些结论的方法，这一定理断言：一般而言，不可能由扰动方法对一接近完全可积的系统（即一具有 n 个自由度，在变化中有 n 个初积分的系统）发现运动的初积分。 科尔莫戈洛夫的定理以后为阿诺德和莫塞所推广且更为广泛适用，因而又称作 KAM 定理，这一定理断言：存在着对于动力学变化不变的集，当我们让扰动趋近于零时，它们有着任意地接近于 1 的相对体积。 当 n 趋于无穷时，对这些集会发生些什么，是经典统计力学中最为令人着迷，也迄今尚未解决的问题。

然而，如果我们追寻玻尔兹曼的思想，同样令人感兴趣的，是那些在很长的时间内（在很大的精确性程度内）没有变化的性质。 内克霍罗谢夫的贡献在于主张一般地，两个对 $\varepsilon = 0$ 脱耦的自由度之间的能量交换 ΔE 为 $|\Delta E| \leqslant A\exp(\varepsilon_* / \varepsilon)^{\alpha}$ 所限定，其中 A、ε_* 和 α 为适当的正的常数。 然而，这一其本身令人极感兴趣的定理，只要我们避开其所考虑的常数的数值估价，却并未揭示出其实际意义。 因此，贝尼廷、加尔加尼和吉奥吉尼的论文就显得特别的重要，他们思考了由两个质点组成的分子，这两个质点由一趋于无穷的常数 k 的弹簧相连接。 内克霍罗谢夫定理表明，振动与平动自由度之间的能量交换将随幂 α 和 k 而指数增加。 在所讨论的第二篇论文中，作者表明 $\alpha = 1/2$，独立于自由度的数目。 因此，我们可以说现代理论的发展揭示出玻尔兹曼对于复杂经典动力学系统行为的深刻直觉，对于这种系统行为的定性研究刚刚开始出现，伴随其而来的，是强有力的分析理论和系统的数字模拟。 后者特别表明了，不能为理论工具轻易地估算出的常数，并非与琼斯所预言的那样，与数十亿年的时间尺度不相容。

这里，我们正面对着这样的一个问题，它既可以简单地被丢弃，也可以极大的热情去投入，以期未曾预料的结果。 或许，我们应当以玻尔兹曼的思想及其自然的发展为向导。 这样，与在时间箭头问题中，我们必须说明为什么不同的气体盒子指向“相同的未来”，并

借助于物理系统绝不是孤立的，而是与宇宙其他部分以多种方式相互作用的这一事实一样，我们在这里要考虑，当诉诸于如此极端长久的时间周期时，我们或者要怀疑我们理论的有效性，或者要考虑即使是微弱的原因，也可能产生(定性的)很强的效果。因此，例如与背景辐射的频率的谐振效应就不应被忽略。当然这只是一个草率的评论，因为对它的详细讨论显然超出了本书的范围。

第九章

玻尔兹曼对其他物理学分支的贡献

玻尔兹曼对麦克斯韦电磁理论的检验

玻尔兹曼的科学活动主要集中于统计力学：在很大程度上是分子运动论，但如我们在第七章中所看到的，他也奠定了一般类型系统的平衡态统计力学的形式体系，而通常这种统计力学的来源，多少是清楚地归功于吉布斯的。

我们在第一章中也附带地提到，玻尔兹曼对于他那个时代物理学中所有为人们所关心和争论的问题，都有所涉及。事实上他的论著的约一半论述的是广泛领域中的成就，其范围跨越物理学、化学、数学和哲学。在本章中，我们将考察玻尔兹曼的科学活动中的这些第二位、但不可忽视的方面。他的这些第二位的活动有一个明显的共同点：其中大多数玻尔兹曼所写的科学论述，表述的是某种他与其他

科学家，或是与他的学生交往中的回应。

我们回想起在第一章中，玻尔兹曼为探索麦克斯韦方程，尤其是电磁学与光学的统一的理论意义和蕴含，写出了他的第一篇关于电动力学的论文，同时也在发展关于以他的名字命名的基本的积分-差分方程的理论。也还是在此时期，他也正忙于一个定律的实验研究，按照麦克斯韦的图像，这一定律把一确定物质的介电常数与折射率联系起来。事实上，他正确地认识到，这一光学性质与电学性质之间的关系式，如果毫无疑义地得以确证，将以绝对的确定性，揭示出评价电的本性的一条新的途径，而迄今为止对于这一本性的研究，在他看来还是相当模糊的。

从发表于 1874 年的一篇论文中，人们可以得出结论，玻尔兹曼用不同材料所作的实验表明，上述定律在实验误差的范围内，被证明是正确的。

关于玻尔兹曼科学成就的研究表明，到 1876 年之前，他关于同一主题写过一系列文章。值得注意的是，这些文章论述的既有气体，也有固体。对于气体所采用的方法，是对两个同样的电容器填之以不同气体而进行比较。而对于固体，玻尔兹曼运用一荷电导体球施加于一非导体的吸引，来表明对一个硫化晶体来说，介电常数是各向异性的，折射率也同样，其随方向的变化正如麦克斯韦关系所预言。

在其后的几年中，玻尔兹曼开始从事抗磁性的研究。

玻尔兹曼奠定了遗传性力学的基础

大约在 1874 年，玻尔兹曼的科学兴趣转向了玻璃弹性中的延迟效应(或记忆现象)，从而奠定了遗传性力学的基础。从玻尔兹曼的这些论文中，人们得到一个有关理论的实验基础的鲜明思想，而当人们阅读他关于分子运动论的著名论文时，却并没有这么直接的印象。这一现象在以往的文献中并非一无所知，像 W. 韦伯和 F. 克耳劳施这

样杰出的科学家在对线的应力和扭力研究中，已经提出这样的假设，一确定瞬间的张力并不仅依赖于此瞬间的应力状态，同样也依赖于此前的状态。玻尔兹曼接受了这些作者的基本思想，但他也批评了这两篇论文，以及几乎同时代的 O.E. 迈尔的文章中存在的缺乏普遍性的缺陷。在回顾了经典弹性理论的方法——他把它作为思想上的一种普遍性范式——之后，玻尔兹曼讨论了人们应当如何修改这一方法，以把遗留现象也包括在内。他考察了连续体力学基础中非常熟识的其边平行于坐标轴的经典平行六面体，然后说：

> 在一确定瞬间作用于平行六面体表面的力，不仅依赖于此瞬间物体的张力，而且也依赖于此前的张力，而依此假设，对一确定的张力，前面这一张力所发生的瞬间越遥远，其产生的效应就越小；换言之，如果此前已产生过一个同类张力的话，所需以产生一确定张力的力可以小一些。我想把一个前已产生的张力减少了产生同一类型的张力所需的力这种情形，称为前面张力引起的力的减少。

这样，玻尔兹曼引入了“遗传性现象”这一概念(这一术语首先由 E. 皮卡德于 1907 年所使用)，并在 V. 沃尔特拉的论文出现之后成为标准的形式。人们在此发现了对于“记忆忘却”概念的清晰的表述，即当时间 t 趋于无穷时，延迟效应趋于零的情形，这一性质被沃耳特拉认为是遗留弹性的基本公理。

关于具有记忆的连续体的“本构关系”，玻尔兹曼基本上假设它们对应于一种时间分布弹性。这样，与直至当时描述弹性连续体的应力和张力间的经典本构关系的项(包含拉姆系数 λ 和 μ)一起，玻尔兹曼引入了带有无穷小系数的每一此前瞬间 τ 的贡献，由 $-\Phi(t-\tau)d\tau$ 和 $-\Psi(t-\tau)d\tau$ 表示(其中负号表示这一事实，由于记忆效应，所需的力是减少的，而不是增加的)。当然，这些贡献出现

于一个积分中，其中 τ 的变化范围为从 $-\infty$ 到 t；而变量从 τ 到 $\omega = t - \tau$ 的一个明显变化则导致另一个积分，其范围为从 τ 到 ∞。

然后，他用关于笛卡儿正交系的三个轴 x，y，z 的三个位移分量(u，v，w)的导数，来表示张力的分量。这样，具有记忆的连续力学问题显然被确定为一种普遍的形式。当然，剩下来需要做实验的，就是确定弹性系数 λ 和 μ，以及用于描述记忆效应的函数 $\Phi(\omega)$和 $\Psi(\omega)$。

玻尔兹曼继续去描述某些特征性情形，考虑被研究的系统为圆柱形固体(可变形的线)，服从一种特别的扭力，它在时间中按一种确定的定律变化，使得人们能确定拉姆系数 μ 和对应的记忆函数 $\Psi(\omega)$。然后，他把他的理论分析与不同科学家的实验结果相比较。在计算中，他主要使用傅里叶级数展开。

对于玻尔兹曼的这篇论文的进展和历史背景，扬尼耶诺和伊斯雷尔进行了详尽的研究。

在结束本节时，我们的评论是玻尔兹曼的论文包含了“第一个成功的流变学理论”，按照马尔科维茨的权威文章的说法。

回到电磁理论

确实，玻尔兹曼有着更多的不同兴趣。但在我们刚刚讨论过的文章之后，他的理论和实验的活动看来几乎都专注于统计力学，尤其是气体分子运动论。从他的一些学生处，我们可以推断出他对离子化气体和电传导中的不可逆性过程都感兴趣，但从他的论文中，我们也有确实的证据以说明他对于黏滞系数的确定和混合物中的扩散过程的兴趣。

另一个贯穿于玻尔兹曼科学活动中的兴奋点是麦克斯韦的电磁学理论，正是由此出发，他开始了他的科学生涯。如我们在第一章中所

说，自 1886 年始，得自于赫兹对于麦克斯韦所预言的电磁波和光之间等价的实验验证的深刻印象，玻尔兹曼花费了相当的努力以重做赫兹的实验，这些都记载在他离开格拉茨前发表的最后一篇论文中。

玻尔兹曼不仅于 1890 年在格拉茨大学、1891 年在慕尼黑大学开设了关于麦克斯韦电磁学的课程，而且还发表了这些讲稿。这一对于麦克斯韦理论的兴趣的复活或许是赫兹从实验上确证了电磁波的存在的后果，也至少部分地归因于他所致力于的用力学模型来说明不同的现象。其中我们可回忆起波动机器、电容器和一个叫做双轮车的机械模型，它曾被我们在第一章中提到过，主要用以说明一个电路对另一个的效应；如在第一章中说到过的，实际上造出过两个样品，一个在格拉茨，另一个在慕尼黑，都在第二次世界大战中遗失了，但我们能猜测它们多少有些类似于现代轿车上的差动齿轮。

玻尔兹曼于 1895 年还在奥斯特瓦耳德的《精密科学经典论丛》中，发表了经注释的德文本麦克斯韦的“论法拉第的力线”。人们广泛地公认，玻尔兹曼在麦克斯韦理论最终为欧洲大陆所接受的过程中，起到了非常重要的作用。确实令人惊奇的是，他未能像洛伦兹那样，进一步去发展这一理论本身，尽管他手中有着所有必需的工具。其结果，他也就未能把握住麦克斯韦理论的困难，而正是这种困难，最终导致了爱因斯坦的狭义相对论。

玻尔兹曼是第一个证明了电磁理论的时间反演性质的人：麦克斯韦方程在时间方向和磁场方向联合反转，而电场保持不变的情况下保持不变。

理论物理学的一个珍品

在总结我们关于玻尔兹曼对于物理学贡献的思考，并去简略地描述他的数学成就之前，我们必须回顾他在热辐射的热力学上的一项基本成果。这一新的研究领域由基尔霍夫所开拓，他于 1859 年提出了

物体的发射率和吸收率的概念，并证明它们的比率仅依赖于物质的温度，而不是它的本性。他也提出了黑体的概念，定义其为吸收率为1的物体。因此，一个黑体吸收落在其上的全部热辐射，而它发射的辐射仅为温度的函数。在实验中产生黑体辐射是容易的：如果在一个温度均匀的炉子的壁上有一小孔，穿过它的辐射将是黑体辐射。这是由于事实上辐射从炉中逸出的机会很小，因而它将在里面反复地撞击炉壁，并最终完全被吸收。

玻尔兹曼原先的良师益友J.斯忒藩于1879年就已从对一个近似于黑体的空腔的相当初步的实验资料的分析中，确立或许是猜测了辐射能量密度 e 和绝对温度 T 的四次方之间的比例关系。1883年，玻尔兹曼在为维德曼的《增刊》准备H.T.艾迪关于辐射热可能是热力学第二定律的例外的论文的摘要时，了解到意大利物理学家阿道夫·巴托利(1851～1896)关于辐射压强的工作。巴托利的论述激励着玻尔兹曼在理论的基础上对同一关系作理论推导，他把当时还是相当前沿的两个学科——热力学与麦克斯韦方程的思想结合起来，尤其是运用了一个今天已为大学生们所知，但当时还相当新奇的概念，即电磁波对充满辐射的空腔施加了一个压强。此外，麦克斯韦方程蕴含着分布于空腔中的电磁能的存在。

从适当的历史视野来看这一成就，应当指出玻尔兹曼在赫兹证明了电磁波的存在之前三年就做出了这一工作。因此，洛伦兹并不夸张地说把它称之为“理论物理学的一个珍品”，普朗克也同样并非夸张地写道：“麦克斯韦理论得到了来自玻尔兹曼关于黑体热辐射的温度变化的一个简短、但现在却非常著名的贡献的有力支持”。

玻尔兹曼应用现在被称为“通常的热力学关系”——平衡态条件——及均匀性和各向同性，得出辐射压强 $p = e/3$ 且只依赖于温度。特别是他第一个引入了辐射熵。这样，他通过运用热力学第一定律和第二定律于平衡态，得到 $e = \sigma T^4$。

尽管玻尔兹曼当时关于辐射所获得的成果看起来是孤立的成就，没有进一步的结论，它至少表明了热力学与电磁理论之间的一种可能的联系，而正是这种联系，导致了量子论和星际天体物理学的一个重要方面。维恩把玻尔兹曼的论证拓展到了其所可能的最广阔范围。他应用热力学于每个单一频率的辐射，适当地说明多普勒效应，推导出了用他的名字命名的位移定律。这是在不引入更详细的模型或更先进的统计假设的情形下，由热力学和经典辐射的一般性质所能获得的最先进的成果。众所周知，由服从于能均分定律的经典振子假设，导出了瑞利-琼斯定律(与实验不符)。由此，普朗克走向了提出他的定律和光量子假设(见第十二章)。

数学与力学基础

作为本章的最后一个论题，如前面已提到的，我们想简略地论述一下玻尔兹曼在数学和力学基本公理方面的成就。

首先，我们要破除一个关于玻尔兹曼对于微积分不能得心应手的荒诞说法。玻尔兹曼能非常自如地使用它们，否则，他如何敢于首先去进行复杂的热力学计算，并引入差分-微分方程呢？然而，他确实有着一个有限论者的数学概念。微分对他而言是有用的工具，但重要的是增量比。关于这点在他的文章中并不鲜见：

> ……如果我告诉某人对数列 $1+1/2+1/4+1/8+\cdots\cdots$ 进行相加，并扩展至无穷多项，他无法这么做；但如果我告诉他相加到如此多的项，以至于进一步的增加将不再会明显地影响到结果，我给了他一个清楚而可执行的指令，而所有对无穷多项的和等于 2 的证明不过是表示：如果你再加上成百上千项，也决不会超过 2，尽管你可以愈来愈趋近于它。

稍许往下，在一个脚注里：

> 与原子论观念相分离的微积分演算的概念是典型的形而上学的，如果我们按照马赫的恰当的定义的话，这里，我们指的是那种我们已忘记了是如何得到它的观念。

并且还有：

> 当以积分演算符号进行迄今已习惯的操作时，人们可能暂时忘记，在形成这些概念时，我们是使自己立足于从有限数目的元素开始的，但我们不能真的避开使用这一假设。这也是为什么弹性体的相互作用的原子团，在直觉上要比相互作用的体积元更为清晰的原因。这自然并不排除，一旦我们已习惯于体积元的抽象和其他积分演算符号，并实际用它们来运算，当我们推导福耳克曼称之为粗糙现象的某些公式时，不再回忆起这些抽象的特定的原子论意义或许是方便的和便利的。这些抽象构成了所有案例的一般框架，我们在其中可设想每立方毫米的元素数为 10^{10} 或者 $10^{10^{10}}$？或者还要多成千上万倍。由此，它们尤其在几何上是必不可少的，当然它们也必然同样适用于最为变化的物理情形，其中元素的数目大相径庭。在应用这种模式时，把它从中发生的基本观念搁在一边，或忘掉一会儿通常是方便的；但我认为无论如何，相信人们因而可摆脱它则是错误的。

我们也能回想起玻尔兹曼曾关心过由物质的原子模型所产生的数学问题。我们已经提到过（见第五章）一篇论文，他在其中对于人们基于物理学基础所期望的碰撞不变量给予了数学上的证明。这里，我们要提到他的一篇题为“论具有周期性系数的微分方程的积分”，这是一篇探究柯西定理对于带有周期性系数的微分方程的有效性的文

章，这种探究对于证明关于弹性连续体的方程是否适用于其定域性质在原子间周期性变化的晶态固体是很有必要的。

在生命的最后岁月里，玻尔兹曼开始对非欧几何和康托集合论感兴趣，他甚至还就此作过讲演，从而引出了学生恶作剧的诗句，我们在第一章已引用过这些句子。

玻尔兹曼的一个不应被忽视的兴趣，当然是力学的公理化基础，这种兴趣来自于他对力的概念的批评和为赫兹所提出的经典力学原理的新说明。尽管在下一章中，我们会有机会对这一兴趣的哲学方面加以评论，我们在这里还是忍不住注意到，玻尔兹曼感到有必要写一本两卷本的书，作为他的气体理论两卷中间的穿插。为便利于读者，我们要告诉大家，这本书中的重要部分已被翻译成了英文。

图 9.1　普尔茨布拉姆所绘卡通画中玻尔兹曼正在应用力学原理和基本方程。

在第一卷中，我们发现玻尔兹曼在关于粒子的可区分性定义上，

曾作出过概念上的贡献。说两个粒子是同一的，但却是可区分的，这意味着什么呢？看来玻尔兹曼第一个认识到，当我们说“同样的质点”时，应当限定我们的意思是什么。为使这一问题更加清楚，设想我们让某人看放在桌上的两个同样的球，然后要求他闭上眼睛，过上一会儿后再睁开。于是，我们问这人，在此期间这两个球是否被调换过了。他无法回答，因为这两个球是完全一样的。而我们知道答案。如果我们调换了球，那么我们就能追踪使球从起始位置到最终位置的连续运动。这一简单事例表明了由玻尔兹曼制定的经典力学的第一公理，其根本的意思是：不能在同样的时间占据空间中同一点的同样的质点，可由它们的起始位置和运动的连续性来识别。玻尔兹曼强调，这一假设本身，就能“使我们认识在不同时间的同样的质点”[25，第一卷，第9页；26，第230页]。这一性质有着特别开拓性的层面，因为它表明对比于现代量子力学中的不可区分的粒子，我们所理解的经典全同粒子的蕴含是什么。

玻尔兹曼也在思考着关于原子的非常不平常的观念。因此，我们读到[25，第一卷，第4页；26，第227页]：

> 人们不必总是寻求这一图像的形而上学缘由，也不必急于从中得出推论，例如说化学原子是质点。我们不应忽略这种可能，它在某一天会为完全不同的图像所取代，比如说为避免看上去过于小心，那些取自于甚至缺乏我们的三维空间性质的流形的图像，由此，例如原子论的简单的几何构造将不得不为数字的操作所取代，以形成一个复杂的流形。

更具有开拓性的方面包含在关于改变力学公理的可能性的讨论中。汉斯·莫茨认为，这些部分为爱因斯坦所知晓，从而铺平了通向广义相对论的道路。我们在这里将仅限于陈述事实。

当讨论到惯性系和鉴别它们的可能性，并说到“我们正趋于认

为世界是有限的”时，玻尔兹曼继续说[25，第二卷，第334页；26，第264页]：

> 完全独立于此，存在着这样的问题，即是否这里的力学方程发展了，从而惯性定律或许也仅为近似正确；更准确地说，图像中不得不采用坐标系和质点的不可几性，或不如说是非均匀性是否会自己消失了。

在这一卓越的句子承认了牛顿力学的原理，尤其是其中的支柱之一可能不过是近似正确的之后，玻尔兹曼继续讨论我们所称的马赫原理[25，第二卷，第334页；26，第264页]：

> 这里，马赫指出了一种更为正确的图像的可能性，这种图像来自于假设只有两个物质粒子之间距离变化的加速度才主要为相邻质量所决定，而在决定其速度的公式中，非常遥远的质量是决定性的。这就很自然地避免了在图像中采用任何坐标系，因为现在只是一个距离的问题。

227

这里，或许“相对位置”是一个比距离更恰当的词。

玻尔兹曼注意到，马赫在得出这一见解时，也引入了其他的困难。不同于其他一些物理学家，他不认为它是什么“特别大的困难”，尽管他评论说它们看来“永远排除了所有的经验检验”。今天读来，这是另一个卓越的句子，今天大体物理学家们正寻找“失踪的质量”以证实马赫原理。

但这还没有完，在几个进一步的评论之后，玻尔兹曼说[25，第二卷，第334页；26，第264页]：

> 在所有事件中，我认为我们视野的这一种拓展——通过指出

我们当作是最确定和最明显的东西或许仅仅是近似正确的——是最有价值的。它是与下述意见一致的，即确定星体之间的距离或许是在曲率很小的非欧几何空间中构造的，这种曲率当然是与引力定律相联系的，在此空间中，运动物体不为力所作用，于是，在千百万年之后，它必然回到其原先的位置，如果曲率为正的话。

这是最为令人震惊的一段，在莫茨看来，它似乎包含了广义相对论的种子。不幸的是，像在其他地方一样，英文翻译是不准确的，这一点已为莫茨所强调。最显著的是，从德文文本派生出的句子是空间曲率当然与引力定律相联系，而这个德文文本中说的是曲率与惯性定律相联系。即使我们忽略这一译者事后才说明的令人难以置信的“发现”，玻尔兹曼仍然作出了一些清晰的陈述：空间可能是具有与惯性定律相关的(很小！！！)曲率的非欧几何的。高斯和黎曼都曾考虑过空间或许是非欧几里得的可能性，后者提出过这一假设对描述物理现象可能是有用的(见第二章)。而玻尔兹曼观点的新奇之处在于马赫原理与曲率之间的联系，以及在一有限空间中，惯性系的问题会自动解决的可能性，规律对于所有观察者都是同样的：这也正是爱因斯坦广义相对论的基本观念。当然，玻尔兹曼所缺乏的是空间概念必须为空-时概念所取代，而这一概念则需要狭义相对论的思想来启动。

那么狭义相对论又如何呢？玻尔兹曼与它的诞生有什么联系吗？这一点已为西格弗里德·瓦格纳所研究。他所强调的一点，是玻尔兹曼是第一个在一本教科书中讨论坐标系的位移的人，尽管有几位作者(路德维希·朗格，施特赖因茨，诺依曼)曾用过相关的术语。玻尔兹曼完全了解涉及空间和时间的基本问题，他明确地假设需要刚体棒和普适的时钟，并详细讨论了坐标系的变化。下一位这么做的作者是爱因斯坦，在他奠定狭义相对论的基础时；惟一的变化当然是没有绝对的时钟，而只有光速是绝对的。

玻尔兹曼详细地讨论了坐标系的运用。这里，我们只引用几句话

[25，第一卷，第7—8页；26，第229—230页]：

> 为在任意时间确定位置，我们想象在所有时刻，在空间中都有一确定的长方形系统……当然，坐标系并不是实在的，但按照我们目前所处位置的观点来看，这并不会产生困难，因为我们当下所关心的只与构造和心理图像有关……上述图像之所以清晰的原因是很显然的：它们是思考空间情形的惯例，每一个人都能近似地用米尺和铅笔，或是木棍和编织针，很容易地来表示它们……

更为直截了当地，爱因斯坦定义坐标系为“三条刚性的实体线，彼此正交，并从同一点发出”。

在爱因斯坦的论文前一年发表的玻尔兹曼讲义的第二卷中，在上面所引的与马赫原理相关的关于惯性系的讨论结束时，我们读到一个有趣的句子[25，第二卷，第335页；26，第265页]： 229

> 然而，惯性定律对以太粒子本身并不成立；麦克斯韦方程只能如此来表述，使得它只决定邻近的体积元，从而我们无须绝对空间来表述它们。由这一类尚未发展的理论中所作出的工作，并非我们在这里所关心的。

再一次需要对英文的翻译作出一些评论。首先，我们注意到光以太一词被简单地翻译成“以太”。这当然是有道理的，但作此评论的理由在于下面所要说的话。其次，这一段最后部分对原文是相当不忠实的，原文说的是“现在是离我们很远的”。如瓦格纳所评论的，为玻尔兹曼所预见的发展仅在一年之后就发生了。这表明玻尔兹曼是一位非常杰出的物理学家，而不是说他是一位先知。我们注意到，在那时被正确地看作是狭义相对论的先驱的洛伦兹和彭加

勒，还仍然在使用以太，或是绝对空间。

现在，我们愿如瓦格纳所提议的，把玻尔兹曼的上述段落与爱因斯坦的开创新纪元的论文中第二页上的一句话相比较：

> 引入一种“光以太”将被证明是多余的，因为这里将发展的理论无须一种“绝对静止的空间”以提供特殊的性质，也不必对空洞空间中一点指定一速度矢量，电磁过程发生于这种空间中。

这里的类似性是明显的；尤其是玻尔兹曼和爱因斯坦两人都使用了光以太一词，而如瓦格纳所说，通常仅说以太就足矣。因此我们在这一点上不能指责译者。

这些巧合是偶然的吗？按照瓦格纳的说法，这些不是巧合。尽管爱因斯坦没有清楚地提到过玻尔兹曼是他做学生时研究过的作者，菲利浦·弗兰克所写的他的权威的传记确认他事实上的确研究过。尤其是弗兰克说到，从赫兹和玻尔兹曼的工作，爱因斯坦“学到了如何构建数学框架，然后借助于它来建构物理学大厦”。

在我们这里的讨论（和第六章中的讨论）之后，我们将在第十二章再回到玻尔兹曼与爱因斯坦之间的联系上来。

第十章

玻尔兹曼的哲学思想

实在论者，但非素朴实在论者

如我们在第一章中所注意到的，在他生命最后的岁月里，玻尔兹曼将相当多的时间奉献于科学的哲学方面，以及更一般意义上的知识的哲学方面。他的《通俗文集》中收集了他在此领域中所写就的文章，其中部分被译成了英文。1903 年，对于他的哲学工作的充分认识，确保了他被任命为维也纳大学的科学哲学讲座教授，成为恩斯特·马赫的继任者。他用特别的速记方法写下的一些科学性更强的讲演，近来已经注释后用德文发表。

职业哲学家或许会觉得玻尔兹曼的想法有些朴素，但事情并非如此。确实，玻尔兹曼是位实在论者，但却并非素朴实在论者。读到下述章节的哲学家应当考虑到玻尔兹曼的世界观，是每一位物理学家在研究其问题时，脑海中都会呈现的图像，即使有时他并不承认它。

此外，如我们将要看到的，玻尔兹曼首创了科学革命的思想，以后为库恩所推广，并被归功于后者。

依据玻尔兹曼的观点，哲学的中心点是存在与知识，或知识论（这一词在英文翻译中通常译作认识论，尽管这多少有些限制其范围）之间的关系问题。要刻画他在这方面的立场，没有比一句几乎是随意地穿插在他的一篇最少哲学意味、却最为逗乐的随笔中的话更好的了，这是一篇描述他 1905 年的“黄金国（加利福尼亚州）”之旅的文章。这句经常被引用的话是接着他对伯克利加州大学校园的描绘之后的：“伯克利是一位备受尊崇的英国哲学家的名字，他甚至被认为是人类的大脑所孕育出的最伟大的劳而无益的思想——哲学唯心主义的创立者，这种哲学观点否认物质世界的存在。”

如人们所熟知，贝克莱的思想是康德的分析的出发点之一，他说任何我们所断言的关于外部对象的特定知识，都是通过我们的感觉得来的（这是很难争辩的），因此最多不过是间接的和可质疑的，其结论是我们能直接知道并能确定的，只不过是我们的思想（包括感觉资料）。

图 10.1　普尔茨布拉姆所绘的卡通画中，玻尔兹曼正在沉思哲学原理。

在开始更详尽地分析玻尔兹曼的哲学观点之前，我们认为要作出关于哲学主题的陈述总是很困难的，因为语词的意义随时间不断在变化，甚至在同一时期，也应不同的哲学家而变化。以后我们将就“实在论者”一词再作些说明。而目前，我们将满足于下述含义：实在论者，是指那些相信外在于我们的世界，独立于我们的感觉、观察和意识而存在的人，因此，人的精神能借助于感觉和多少是精确的实验，以如此方式构造出这个世界的映象，使得这一客观映象不能清晰地包含我们的感觉，但却能说明所有的感觉。这种详细的定义是必要的，否则即使是贝克莱也能被称为实在论者了，因为他说过感觉的对象不是别的，不过是不被感知就不能存在的思想，而它们的存在由能感知它们的某种精神(例如上帝)来保证，尽管我们无从感知。

另一个需要定义的词语是“形而上学”。尽管有些哲学家给此词以更宽泛的意思，科学家脑海里一般所想到的(玻尔兹曼尤其如此)，都如康德在他的小册子《未来形而上学导论》中的定义：

> 首先，关于形而上学知识的源泉。形而上学知识这一概念本身就说明它不能是经验的。形而上学知识的原理(不仅包括公理，也包括基本概念)肯定不是来自经验的，因为它必须不是形而下的(物理学的)知识，而是形而上的知识，也就是经验之外的知识。

这就是我们所坚持的形而上学的含义。

那么，依照玻尔兹曼的观点，存在是不能还原为主体的感知的我们又如何能说服我们自己呢？在上面提到的那本收集了他面向一般听众所写文章的书中，我们可以在其中的一篇中找到他的回答。这篇短文题为“论无生命界中过程的客观存在”(1897 年)。在那儿，我们读到：

> 我们说，思维的目的在于为我们的思想确立规则基础，使得未来的感觉因而能得以预先宣告。如果我们把得自于涉及我们自身身体的感性复合体的经验，也应用于那些相关于他人身体的非常类似复合体的相互作用，这一目的在很大程度上就达到了。

作为我们或多或少无意识行事方式的典型事例，玻尔兹曼指出某个人的手表现出就好像接触了火、发生了疼痛的感觉一样，他的嘴唇表现得好像意志作用于它们一样。对于这些他人的感觉和意志，我们缺乏最起码的知识。实际上，我们只知道我们自己关于它们的想法，对于这些想法，我们就像对自己的感觉和意志的想法所做的一样。这样，我们就得到了构造和预言我们自己关于他人身体的感觉进程的有用规则。由此，当我们断言这些类似的感觉和意志的存在，就像我们自己感觉和意志的存在一样时，我们意味着什么？它看起来在事实上添加了一些假说的和未经证实的东西，违背了我们的思想仅仅描述事实的任务。然而，玻尔兹曼谈到，这导致了唯我论（他称之为观念论）：

> 然而，如果某人准备断言，只有他的感觉存在，而所有其他人的感觉，只不过是某些他自己的感觉之间的因素在他头脑中的表示（让我们称他为观念论者），我们首先必须要问，他这么说究竟是什么意思，他是否以正确的方式表达了他的意思？

在玻尔兹曼看来，观念论者究竟应如何来表达呢？他应当说："我以三种方式，来把'感觉'或'意志作用'这类词作为思想符号：首先，表征那些即刻给予我的感觉和意志；其次，如果我发现它可用于按照相同的定律来联结相同的项，以便描述我的感性复合体之间的某些规则性"。在指出应用上面提到的词的第三种方式之前，玻尔兹曼注意到人们应当指出这些词语是他人感觉和意志的符号，以

区别于第二种运用方式。第三种方式或者应用于这样的人，他过去曾错误地认为所考虑的这些词语适用于表征上面提到的感知规则性，或是用于这样的人，他不相信这些，并出于完全不同的原因(例如实践，游戏)，把相当类似的词语结合起来：这些词语可称作仅仅是假想的不存在的人的感觉和意志。

然而，按此方式，观念论者的断言在玻尔兹曼看来，就不再有异于通常表达事物的方式。第二种方式表达了存在于描述其自身感觉者与他人之间的极为主观的差异。我们如何能给予其他人的感觉以客观存在呢？我们共同的语言早已找到了解答：当我们说它们不是我们的，而是他人的感觉时，我们认识到自己已经含糊地认可了必然有其他人，因为这是迄今为止，说明我们的感觉的复合性的最简便的途径。

类似于他人的感觉，无生命自然界中的过程对我们也同样仅存在于想象中。换言之，我们用确定的思想和语词记号来标记它们，因为这便利于我们建构一个世界图景，以能预告我们未来的感觉。如玻尔兹曼所说：

> 无机界中的过程在这方面正像他人的感觉一样，而无生命的客体自身也像其他客体一样，除了它们关联的记号和定律与那些表征我们自己感觉的记号和定律大相径庭以外。

这样，“一个无生命的客体存在或不存在”的句子与“一个人存在或不存在”有着同样的意义。因此，玻尔兹曼说，这么一种想法是错误的，即相信以此方式，人们确定出物质比他人更是一种精神实体。这样，当说原子存在，我们可以加上一条推论，这也意味着它们在它们被实验证明之前就已存在，正如同一个孩子的存在先于我们看见他，或先于他被起名字一样。

当然，承认作为我们同伴的人的存在是基本性的。事实上，我

们的世界图像得以进一步发展的重要方式之一，就是通过与他人的交往。这并没有指出在一开始，每个人都会很自然地把自己作为说话者(主体)与其他人作为受众(客体)区别开来，并在起初就采取了一种(主观的)立场、一种观念论者的语言，它们是玻尔兹曼所提出的方式中要纠正的。

然而，在科学中所使用的语言，必须是同样适用于所有其他人的词汇，或如我们通常所说，我们必须采取一种客观的立场。这样，那些先前与“存在”或“不存在”相联系的词被证明在很大程度上其适用性并未改变。那些我们仅仅凭想象或设想、而并不为感觉的复合体(第三种方式)的规则性所规定的人或无机物，对其他人也不存在；他们“客观上”不存在。

然而，这是一个必须加以考察的关键点。我们在此也看到玻尔兹曼是如何地超前于他的时代的。这一论题即使在今天，也像对于他一样重要。无机界中的过程与心理过程是否有着许多类似之处？或是人们能在二者间划出如此明确的界限，说前者能被描述为客观上不存在的吗？

玻尔兹曼所使用的，是连续性论证。开始，他说高等动物的感觉是如此完备地类似于人，我们必须把客观存在性归属于它们。那么，这种(客观存在的)边界在那儿呢？玻尔兹曼是这样回答的：

> 人们确实偶尔会听到这种疑问：昆虫或可分的动物，如某些蚯蚓是否会有感觉？但关于感觉终止于何处的明确界限却无法确定。最后，我们达到了非常简单的有机物，它们的世界图像和思想等于零。如果我们不想突兀地否认感觉低于某一水平的动物的存在，这将是很不适当的，那么我们也必须把这类不能思想、无法发现其感觉的有机物也归之于客观存在，然而这又依次传递其连续性等级至植物。但在我看来，否认无机物的存在也是一个未经辩护的和不恰当的跳跃。

玻尔兹曼也注意到，我们称之为单一个体的一连串的感觉和意志总是很快又再次中断，那个个体的人死了，但这些精神现象曾与之连接的躯体却依然留存。于是，那种主观的世界图景，它把物质看作为仅仅是表达了某种持续于时间中的人类感觉的复合，开始试图用符号来模仿暂时的和复杂的特征，只是到了后来，才用这些图景来表征物质的简单的和更永久性的特征。用玻尔兹曼的话来说："它把埃及的金字塔、雅典的卫城看作为不过是存在于千百年世代人类的感觉间的方程。"

共同的使用和随后的科学(它应是前者借助于更精细方法的延续)，说明了一种更简单的(客观的)图像，它从简单的事物出发，用支配更为永久特性的规律，来表征暂时的东西。用玻尔兹曼的话来说：

> 追求我们精神图像的一致性，即按照总是得出为经验所证实的规则，我们达到的结论是作为行星的火星，有着类似于地球的大小，它也有大陆、海洋、终年积雪的高山，等等。的确，这决非全然不可能的，即其他太阳的行星上有着最壮观的景色，却并没有任何生命体以产生感觉印象。

作为对比，唯心论者把物质与我们的感觉具有同样程度的存在的断言，比之于那种孩童的意见，即石头在被撞击时也会感到疼。玻尔兹曼把一个相似的，但却更好地确立起来的论点赋予了实在论者：

> 实在论者把那种有人绝不能想象精神能为物质的东西所表征，更不用说原子的相互作用所表征的断言，比之于未受过教育的人的意见，即太阳不可能距地球有9 300万英里，因为他无法想象这一距离。正如观念论是一种只对某些人而非人类作为整体的世界图像，因此我认为，如果我们包括动物甚至宇宙在内，实在论的表达方式要比唯心论的方式更为恰当。

以如此生动的形式表达出来的玻尔兹曼的见解，显然是不同于他的同事恩斯特·马赫的，后者也同样既是物理学家，又是哲学家。这里，是马赫所作出的断言的两个例子："因此，世界仅仅是由我们的感觉组成的这一断言是正确的。在此情形中，我们所拥有的知识，不过是关于我们的感觉的知识……"；"……在物理的东西和心理的东西之间，在内在的与外部的东西之间，一个外在的'事物'所对应的感觉与感觉之间，没有任何区别。"

用玻尔兹曼在驳斥奥斯特瓦耳德时(1904年)所说的话来说：

> 马赫指出，我们只不过是给我们的印象和思想以似规律的过程，而所有的物理量、原子、分子、力和能量等等，不过是为了经济地表征和说明我们的印象和思想的这些似规律的关系的概念。

现在，玻尔兹曼在无疑赞赏思维经济在科学成果的分类和排序中的重要性的同时，并没有把这种思维经济等同于科学研究的最终目标。在他1892年的论文《论理论物理学的方法》中，我们事实上可以读到：

> 在数学和几何学中，从纯分析的方法向构造的方法和借助于模型来说明的回归，起初偶尔是为经济的努力所需要的。尽管这一需要看来是纯实践上的和明显的，但也正是在这一领域，一种全新的方法论思考发展起来，并由马赫给出了其最为准确和真实的表述，他直接宣称所有科学的目标为经济的努力。借助于几乎同样的公正，人们可以宣称，由于在商业中最大的经济是所期望的，因而它简单地成为商店和金钱的目的，这在某种意义上是正确的。然而，当研究固定星体的距离、运动、大小和物理-化学过程时，或者当显微镜被发明出来并借助于它来发现疾病的原因时，我们很难称这仅仅是为了经济。

在玻尔兹曼看来，精神过程与物理过程的内在联系，最终要由经验来给予我们。这种联系使得很有可能对于每一个精神过程，都有与其对应的一个大脑中的物理过程，一种一一对应的关系，而后一种过程真正是物质的，即可由与在无机自然界中的过程相同的图像和定律来表征的。其推论是，所有的精神过程至少在原则上必须是可由用于表征大脑过程的图像来预言的。

这把我们引向了玻尔兹曼在其哲学著述中所提出的另一个论题，即自然作为一个巨大的机器，其达到的顶点被认定为达尔文的进化论和自然选择。即使理论物理学的成功也可在进化论的基础上来说明，如人们在前面所引用的文章“论无机自然界中的过程的客观存在问题”中所读到的：

> 我们看作为生产世界图像的装置或器官的大脑，是一种由于这种图像对于保存物种的巨大效用性而发展得近乎完善的器官，正如长颈鹿的颈子和家畜的嘴呷总是长得不同寻常的长一样，这也验证了达尔文的理论……我们在赞同(所谈到的)这一观点的同时，也必须假设，用以表征无机自然界中的过程的图像和定律，足以不含糊地表征精神过程；简言之，我们说精神是与大脑中的某种物质过程同一的(实在论)。

239

早在1886年，玻尔兹曼就已经对这些论题有过论述，尤其是关于生命的起源与思想和感觉现象之间的关系：

> 然而，在科学问题中，我想使这种感觉失去其权威性：哥白尼的同时代人是同等地直接意识和感觉到地球是不旋转的。然而，最为直接的途径，依然是从我们当下的感觉出发，去证明我们如何能应用它们获得关于宇宙的知识。但由于这看来不会把我们引向要去的目标，让我们来遵循与之相反的自然科学的路

径。我们构造这样的假说，说原子复合体的发展，使得它能通过在它们周围形成类似的物体来繁殖自身。如此产生出来的较大的质量中，那些能通过分裂来繁殖的，以及那些具有迁移到适宜生活的条件占压倒优势的地方去的倾向的，是最有可能生存下去的。

而这一点，又为对于外界印象、化学构造和周围环境的运动、光和阴影的接受性所极大地推进。敏感性导致了感觉神经的发展，运动性导致了运动神经的发展；遗传而来的感觉导致了强制性的讯息，使中枢神经逃避那些我们称之为疼的东西。关于外部事物的相当粗浅的符号留在了人们脑海中，它们在复杂的情形中，会成为复杂的记号，甚至在需要时，会成为对外界的相当粗糙的想象，正如代数学家可用任意的字母来表示数量，但通常都愿意选相应词汇的第一个字母一样。如果对于个体本身存在这么一种进化的记忆符号，我们就定义它为意识。这里，在密切联系的清晰意识到的观念和储存在记忆和无意识的反射运动之间，有着一条连续的路径。我们的感觉难道没有不止一次地告诉过我们，意识是某种完全不同的东西吗？然而，我有着沉默的感觉：如果假说说明了所有相关的现象，那么感觉将不得不如同在地球旋转的问题中让位。

1905年1月，玻尔兹曼在维也纳哲学学会作了一次演讲。演讲的题目原定为《证明叔本华为一个愚蠢无知的假哲学家，只会乱说一些根本上搞乱人们思想的废话和空话》。这个题目听起来有点刺耳，因而被拒绝了，简单地改换成《论叔本华的一个论题》，但在会议上成文的论文中，玻尔兹曼指出了他原本用了前一个题目，并说明这个题目是从叔本华本人的一篇文章上取来的，只不过换了所涉及的哲学家的名字(尽管玻尔兹曼没有说出这位哲学家的名字，即指的是黑格尔)。在这篇文章中，所有哲学家的思想，包括康德(尽管玻尔

兹曼对他还是较尊重的)在内，都被认为是基本上不合理的。他宣称他的目的，是把人类从被称为形而上学的精神症状中解放出来。在这篇文章中，玻尔兹曼清楚地称他自己的哲学为“唯物主义”，他说：“唯心主义断言只有自我存在，只有各种观念存在，并寻求由此去说明物质。唯物主义则从物质的存在出发，寻求由此来说明感觉。”

那么，在玻尔兹曼的哲学中，是如何设想观念或那些康德称之为先验的东西的呢？人类所拥有的观念要归功于进化：

> 在我看来，哲学的全部出路来自于达尔文的进化论。只要人们相信有一个特殊的精神能无须物理手段而认识对象，相信有一种类似的特殊的意志，它对我们是仁慈的，那么即使最简单的心理现象也将无法说明。
>
> 只有当人们承认，这种精神和意志并非某种存在人的身体之外高高在上的东西，而不过是其物质部分的复杂行为，其行为能力随着发展而不断完善；只有当人们承认直觉、意志和自我意识不过是物质的这些物理-化学力的最高阶段，由此，原生的细胞质能寻找更有利于它们的区域，并避开对它们不利的区域；只有此时，一切事情在心理学中才是明白清晰的。

在同一演讲的后面，玻尔兹曼举出了一个进化在人们习惯中发挥作用的有趣事例：

> 考虑另一个非常简单和平常的事例。在我们的原始初民中，肯定有许多人是因为饮用了不干净的水而死去。这样，那些喜爱水果汁的人有了优势。但那些未经发酵的水果汁也很容易含有细菌，因此那些偏爱发酵果汁的人在生存竞争中又有了优势，随着这种偏好的遗传演化，它成为一种经常做得很过分的习

惯。我必须承认，如果我是一位禁酒主义者，我可能就从美国回不来了。由于饮用了不卫生的水的缘故，我得了严重的痢疾；即使那些带有矿泉水商标的瓶子里，也可能大多数装的是河水，全凭了酒类饮料，我才得以活命。

“那么逻辑中的思想规律的地位是什么呢？”玻尔兹曼如此自问。他紧接着答道：

在达尔文理论看来，它们不过是继承下来的思维习惯。人们已经逐渐习惯于固定和组合词汇，通过它来彼此交流，并在思考时在心中默述，……由此方式，使他们总能以所期望的途径去干预现象界，并引导他人去同样地与他们交往。通过储存和适当地排列记忆图像，通过学习和实践言谈，极大地促进了这种干预，而这种促进就是真理的创造。

这种把精神图像聚在一起并加以默述的方法，与言谈词语一样，以这么一种方式逐步完善并遗传下来，使得思维的规律得以发展起来。显然，如果所有的认识被终止，感知也完全分离，我们也就不可能再有这些规律。

以如此优势的方式去行动的努力，已经完善了这些观念，以产生一个意志和表象的世界。玻尔兹曼嘲讽地加上一句：“即使是叔本华，也不可能期望更好的结果。”

我们在什么意义上能称这些思想规律是先验的呢？玻尔兹曼是这样回答的：

由于通过千百万年来我们物种的经验，它们已经成为每个人所固有的，但当康德推论它们在所有情形中的一贯正确性时，这看来不过是一个逻辑上的错误。

> 按照达尔文理论，这个错误是完全可以解释的。只有那些确实的东西遗传下来，而不正确的东西都被丢弃了。这样，这些思维规律获得这么一种不可错性的外表，甚至经验也被相信能用于它们的证明。……正因为如此，人们曾假设耳朵和眼睛是绝对完美的，因为它们确实发展到了惊人的完善程度。今天，我们知道这是一个错误，它们确实是不完善的。
>
> 类似的，我也否认我们的思维规律是绝对完美的。相反，它们已成为如此确定的习惯，经常被强调得很过分，而即使当这种强调不适当时，也不会排除它们。这样，它们就与其他遗传习性并无区别。

在他的演讲的最后部分，玻尔兹曼评论说：我们还有着其他错误的信念，指的是在他的时代还不那么广为人知的数学的优越性：

> 同样，反对非欧几何和四维空间的偏见也正在消失的过程中。大多数人仍然相信只有欧几里得几何是可能的，三角形的内角和必须是180°，但有些人已经开始承认这些是习惯性的观念，我们能够也必须从中把自己解放出来。

思维定律与科学概念

在这一点上，人们可以理解玻尔兹曼对于赫兹的批评，后者在其著名的关于力学原理的著作中，提出我们的精神图像必须与思维定律相一致。在他1899年在克拉克大学的讲演中，玻尔兹曼已经写道：

> 与此相反，我愿极力主张持保留态度，或至少进一步说明这一要求。确实，我们必须致力于存储充裕的思维规律；没有它们，经验将是全然无用的，因为我们不能用内部的图像来确定

> 它。这些思维规律几乎无一例外，都是固有的，然而它们仍然要通过培养、教育和我们自身的经验来加以修改。对于一个孩童、一位受过简单教育的人，或是一位学者，它们并非完全相同的。

在指出哲学中类似的进化后，玻尔兹曼认识到存在着某些我们看作是基本的共同假设，它们不仅存在于日常生活中，同样也存在于科学中：

> 确实存在着业已被证明为是可靠的思维规律，我们对于它们有着无条件的信任，把它们看作是思维的无可更改的先验原理。然而，我认为它们仍然是逐步发展的。它们最初的来源是人类在其原始状态的初始经验，然后通过复杂的经历，它们日益强化和明确起来，直到最后被设想为当前的形式；但我不希望把这些思维规律看作是至高的独断者。我们并不知道它们在未来是否要经受这样或那样的改进。

然后，玻尔兹曼回顾了一些孩子或未受过教育的人是如何地确信，仅凭我们的感觉就足以确定空间中所有点的上下方向，他们并由此设想，可推断出相对称的反方向是不可能的。如我们在第三章中所见，这也是伊壁鸠鲁的观点，卢克莱修详尽地阐述了他的观点。那么主要的危险在哪儿呢？那就是如果这样的人来论述逻辑，他们就很可能把绝对的垂直方向的存在，看作是浅显的先验思维规律。玻尔兹曼继续说：

> 正因为如此，人们对于哥白尼理论提出了许多先验的反对，科学史包含着许多这样的事例，对于种种命题的支持或反对，采用的是当时被当作是自明的思维定律，而在今天看来，这些定律都是不成立的。因此，我希望把赫兹的要求修改为：就我们迄今所拥有的思维定律而言，我们把它们看作是经过经验的不断确

证而不容置疑地是正确的，我们可能对照这些定律来检验我们的图像的正确性；但这些图像是否适当的惟一和最终的决定权，在于它们是否能始终简单和恰当地表征经验，因此，这也反过来成为对于这些思维定律的检验。

玻尔兹曼有机会谈到这一主题的另一场合，是在圣路易斯举行的会议上，他在那儿对迄今为止的统计力学作了全面的概括。在此概括之前，他讨论了为什么物理学家会对那些曾经为哲学家们所独擅的问题感兴趣。在我们所提及的这部分演讲中，他论述了哲学家们通常所着手的方式：

在我看来，把这称作逻辑，就好像某人为了山地旅行，想穿上一件带有很多长褶裥的外套，但他的脚总是不断地与这些褶裥搅在一起，以至于他一旦迈出平地上的第一步，就会摔倒。这种逻辑的根源，在于对于所谓的思维规律的过度相信。确实，我们如果没有某种先天的联接感觉的形式，即思维形式的话，我们就不会有经验。如果我们希望称这些形式为思维规律，就它们先于经验就存在于我们心中或(如果我们愿意)我们脑海中这一意义而言，它们当然是先验的。但这看来并没有给我们任何理由，从这一意义上的先验性可以推导出确定性和不可错性。这些思维规律的进化所依据的定律，就像眼睛的光学器官、耳朵的听觉机理和心脏的泵血装置所依据的定律一样。在人类进化的过程中，任何不适应的东西都被抛弃了，从而产生出统一和完善，而正是这种统一和完善，会给人以不可错性的幻觉。

在以类似于前面所引的论述叔本华的方式述说眼睛、耳朵和心脏组织的完善，而我们不能宣称这些器官已绝对完美之后，玻尔兹曼得出结论说："同样如此，更不能说思维定律是绝对不会出错的"。

它们刚刚进化到能理解什么对于生命是必需的，什么是实际上有用的这一点。实验研究的结果更接近于生命，而不是我们的思维机制。因此，如果已成习惯的思维形式并不“完全适应于抽象的哲学问题（它们迄今为止远离了可应用于实践的问题），自泰勒斯至今的哲学也不能如此”，就没有什么可奇怪的了。

在玻尔兹曼看来，这也就说明了为什么生活和科学中最简单的事情，对哲学家而言则成为最困惑的问题，为什么他到处看到的都是矛盾。但存在物中不应包含矛盾，它们是在哲学家的“不适当的和错误的重构”中形成的。当矛盾表现出来并看上去不可避免时，我们应当怎么办？他的回答是：

> 我们必须立即寻求检验、扩展和修改我们称之为思维定律的东西，它们不过是继承和获得的观念，经过了时代的确证，以表征实际的需要。正如那些继承下来的发明，如滚轴、马车和犁等，长期以来被与无穷多的有意识创造出来的人造物联接起来一样，这里，我们也必须重新人为地和有意识地把观念安排得更为有序。我们的任务，不是把数据资料召唤到思维定律的审判席前，而是面向给定的数据资料来调整我们的思想、观念和概念。

如果设定了这一事实，即除了用词语（即使是书面的或默想的），我们不能清楚地表达这么复杂的情况，我们应如何着手做呢？我们必须以这样的方式来配置这些词语，使得应用最合适的表述于已知情形。其后，我们所创造的词语之间的联系将尽可能充分地适用于实在中的联系。当然这听上去很容易；对于问题的最合适的解决仍然会出现极大的困难，但玻尔兹曼说，“至少人们知道了应致力于的目标，不再因自己造成的障碍而失足”。

玻尔兹曼还说到，生命体行为中的许多不适当的特性的起因，在

于这么一个事实，即一种在大多数情形中适当的行为方式成了一种习惯，或者说第二天性。这样“适应成了过分的行为”。这在思想上的习惯中发生得尤为经常，并成为前面提及的那些明显矛盾的根源。自然过程的类规律特征，对于所有认知而言是一个基本的前提，其结果是我们总是要追问原因。这已成了一种不可抵御的冲动，以至于我们甚至要问万物都有原因的原因是什么。

玻尔兹曼说，有些哲学家“用原因和结果究竟代表的是必然的联系，还是偶然的次序这样的问题来折磨他们的大脑”。明智的问法应是一个特殊的现象是否总是与一组确定的其他现象相联系，从而看上去是它们的必然结论？或是，是否这种联系有时并不存在？在玻尔兹曼看来，另一个无意义问题的例子是问什么是生命的价值，因为如果某物能推进个体或人类的生存条件，它就是有用的或有价值的，但如果要问生命自身的价值是什么，这就是做得过头了。

一种类似的无意义的尝试，是采取用以构造所有物体的最简单的概念，然后再徒劳地试图由更简单的概念来构造它们，或是试图说明最简单的基本定律。针对这个问题，玻尔兹曼说：

> 我们必须不是渴望从我们的概念中推导出自然，而必须使概念适应自然。我们必须不是认为每一事物都能按照我们的范畴来安排，或是存在作为这种最完美安排的事物：它不过是可以变化的事物，只是适应于目前的需要。即使是物理学分裂为理论物理和实验物理，也不过是目前所用的二分法的结果，它不会永久地保持下去。

那种有些问题落在了人类认知的视野之外的观点，立即导致了这是人类认知能力的缺陷的观念。但玻尔兹曼认为，这种问题的存在和提出这种问题本身就是一种幻觉。不无讽刺的是，玻尔兹曼注意到，令人吃惊的是在这种幻觉业已被认识到之后，去回答这种问题的

倾向仍没有停止。为什么会这样呢？这又是由于精神上的习性太强有力了，以至于无法放松它对我们的束缚。

可以与通常意义上的幻觉作一类比，这后一种幻觉甚至在其原因已经被认识到后，还会继续存在。因此，一个想进行哲学思考的科学人会经历一种不安全感，会有一种不满足。那么当所有这些幻觉缓慢而逐渐地消褪去以后，哲学的目的是什么呢？玻尔兹曼认为哲学的中心任务是

> 清晰地说明这种在我们的思维习惯上做得过分的不适当性；并且进一步地，在选择和连接概念和词汇时，仅致力于对已知经验的最恰当的表述，而不考虑我们遗传得来的习惯。这样，这些困惑和矛盾必然会逐步地消失。必须弄清楚在思想的大厦中，什么是砖瓦，什么是砂浆，从而使我们从最简单的感觉是最令人费解的、最琐细的东西是最令人困惑的这种压抑的感觉中解放出来。未经证明的思维模式在时间中会褪去，其证据是这一事实：如今任何受过教育的人都理解对映体理论，许多人都理解非欧几何学。

在玻尔兹曼看来，这就是哲学要成为科学皇后所必须付出的代价：要创立一个系统，其中有些问题是未经证明的，因而是不能问的。

玻尔兹曼认识到，对于复杂的经验而言，我们内在的思维定律确实是先决条件，但对于简单的生物就并非如此了。然而，进化从此开始，思维的定律缓慢地发展，但简单的经验已足以产生它们。于是，它们被遗传给更为高度组织化的生物。玻尔兹曼如此来归结他的论证："这说明了为什么它们包含综合判断力，这种判断力为我们的祖先所需要，但对我们而言，则是先天的，因而是先验的，由此可以推断：这些定律是令人非信不可的，但这并不是说它们是不会出错的。"

伦理学、美学和宗教

在玻尔兹曼所提出的哲学中，实践问题占据着什么样的地位？ 在许多人的眼中，正是伦理学这样的问题推动着形而上学，或至少是一种建立在精神而不是物质之上的哲学。 显然，他的理论基础也还是进化主义。 在前面所引的论叔本华的演讲中，玻尔兹曼事实上说到：

> 因此，伦理学必然要问：个人何时可以坚持他的意志，何时他必须服从其他人的意志，以利于家庭、部落，或人类作为整体的存在，由此每个个体能最好地成长？ 然而，如果我们问这样的生命是否应当被促进，或是被压制？ 这种天生的好问就做得过分了。 如果某种伦理学会导致奉行它的部落的衰落，就会遭到拒斥。 在最后的时刻，决定某物真假的不是逻辑、哲学或形而上学，而是行动。 如福斯特所说，“行动是开端”。 能引导我们走向正确的行动的，就是真的。

1904 年，玻尔兹曼在一次讲话中批评了奥斯特瓦耳德的一个讲演，后者在其中给出了关于幸福的一个数学公式(按照这一公式，幸福将由 $E^2 - W^2$ 来确定，其中 E 表示情愿地和成功地付出的能量，而 W 表示不愿意地付出的能量)。 先不谈对这一公式本身的(否定它的)讨论，有趣的是，玻尔兹曼又不失时机地说起达尔文的进化论在伦理学中的作用：

> 说到幸福的概念，我从达尔文理论中得到它。 究竟是在久远的年代里，第一个原生质“偶然地”产生于地球上浩瀚水域中的湿泥里，还是卵细胞、孢子或其他某种胚芽借助于尘土或陨星的形式从外层空间来到地球，在这里都无关紧要。 更为高级的有机体很难从星空中落到地球上来。 因此，在一开始，只有非

常简单的个体、简单的细胞，或是原生质粒子。如所共知，所有这些微小的粒子都经历了不断的运动，所谓的布朗运动；用纯机械的方式，可以说明它们通过吸收相似的组分而不断成长，同样也可以说明它们由分化而不断繁殖。同样可以理解，这些迅速的运动要受到环境的影响和改变。粒子在其中的改变方式是平均而言(按其喜好)，它们总是迁往有着更好的物质(食物)吸收，更能生长和繁衍(一旦超过了它者)的地区。

在这种易于机械地理解的简单过程中，我们把遗传、自然选择、感觉、理性、意志、愉快和痛苦都概括在内了。它所需要的，只是同一原理的不变的应用，不过在数量程度上有所变化，经由整个植物和动物界，而到达具有其全部的思想、感觉、意志和行为、其愉快和痛苦、其美的创造和科学研究、其高贵和邪恶的人类。

那些聚集成更大集合，并在其中形成分工和分群、从而有了分类倾向的细胞，在生存竞争中有着更多的机会，尤其是如果某些细胞在受到有害影响时无以安宁，直到工作细胞把这种侵害(疼痛)尽可能地消除后。如果有害影响不能完全消除，它将持续并留存下只能非常缓慢地消失的紧张，此时，这些细胞的行动是特别有效的，因为当类似的有害情形再度发生时，它将强化记忆细胞，刺激运动细胞，以进行更为有力和慎重的合作。这种状态称为持续不快，一种不快乐的感觉。相反的状态，即完全摆脱了这种烦恼的后续效应，并警告记忆细胞，在类似情形发生时，运动细胞将再次以同样方式行动，这种状态就称作持续的愉快，一种幸福的感觉。

当然，这并非高等有机物的全部感觉，甚至并非有关幸福的生理学探索的开端；但如果希望科学地说明它们，而不仅仅是堆砌一些美丽的、拔高的、诗意的和鼓舞人的词句的话，他们就必须采取那种由相关的现象所确定的观点。

玻尔兹曼对于美学也持有相同的观点，他在莱比锡大学的就职演讲(1900年)中说：

> 我们也必须提到生物学领域中最为辉煌的力学理论，即达尔文学说。它着手从纯力学的遗传原理出发去说明整个植物的多样性和动物王国，当然，像所有关于起源的力学原理一样，它还是模糊的。
>
> 群芳斗艳中花卉精致的美，昆虫世界中极为丰富多彩的形式，人类和动物身上器官的精巧的构造，对于所有这些的说明，构成了力学的领域。我们理解了，为什么对于我们的物种来说，这一点是有用的和重要的，即有些感觉印象是讨人喜欢的，因而去追求它们，而对另一些则讨厌它们；我们认识到去构造尽可能精确的周围环境的图像、并严格地依是否与经验相一致来区分其真假是何等重要。由此，我们能用力学来说明美的概念的起源，就像说明真的概念的起源一样。
>
> 此外，我们也理解了为什么这样的一些个体能够持续地生存下去，它们用其全部神经的能量来憎恶有害的影响，将它们搁置一旁，而用同样的精力去追寻别的对于它们自身或是种群的保存有利的影响。这样，我们也懂得了我们的整个情感生活，愉悦和痛苦、仇恨和热爱、幸福和恼怒，是如何发展的。正如我们不能摆脱身体上的疾病一样，同样我们也不能避免各种情感；但再一次同样的是，我们懂得如何去理解和承受它们。

玻尔兹曼显然意识到这些观念会遇到的困难，人们从他下述在格拉茨大学(1887年)纪念基尔霍夫的文章中可以猜测到这一点：

> 不仅如此，后世万代也不会忘记赞美我们这个世纪所诞生的这位巨人。如果说有什么可与这种赞美相媲美的话，那就是

这同一个世纪中，也未能成功地摆脱如此荒谬可笑的迂腐，摆脱所承继的如此荒唐愚蠢的迷信这一事实……那些蒙昧主义者，那些自由思想和探索的敌人反对新的毕达哥拉斯定理，即达尔文学说的啜泣声听起来不是比以往更响些了吗？……然而，我们是幸运的！这不过是预告春天来临的雷霆。然而，现在就轻松地开玩笑还为时过早；武装你们自己，开展更为艰苦和殊死的战斗。

玻尔兹曼也没有忽略人们在看到美感与善意在被还原为力学时会产生的本能的反感。一首基于对于自然的最简单情感而为现代文明所建立起来的硬痂而叹惜的诗，由诺贝尔奖得主奥德海西斯·埃利西斯所吟出："……随着太阳的冉冉升起，所有关于世界的伟大理论的轰鸣都将归于沉寂……"但科学家可以回答说，他并不会因为懂得了美丽的色彩是由光的散射定律所造成的，而不如别人那么为蔚蓝的天空和火红的落日所感动。同样，一位医生也不会因为了解了消化作用的机制和身体快感的起源，而影响对美味佳肴的欣赏。我们必须在事物和我们关于它们的概念之间作出区别（如斯宾诺沙所说，"狗的概念不会叫"）。但是，还是让我们来考虑玻尔兹曼关于这一问题的想法。在同一次莱比锡就职演讲中，人们事实上可以读到：

我可以预见那些热衷者会如何地为我最后的这些评论而震惊，他们会如何地担忧：所有那些伟大和高贵的东西会降格为死气沉沉和无知无觉的机器，所有的诗意都会失去。然而，在我看来，所有这一类忧虑，都是基于完全误解了我的观点。

确实，我们关于事物的观念与事物的本性绝对不是同一的。观念只不过是图像，或者说是符号，它们表征的必然是事物的一个方面，的确不过是模仿所表示事物之间的某种联系方式，而不可能触及它们的本质特征。

因此，我们无需收回我们前面表述的鲜明性和确定性。在任何场合，我们只是用它们来断言精神现象和自然中简单机制的某种类似。我们仅仅构造了一个片面的图像，以澄清现象之间的某些联系，并预言我们未知的新的现象。与此图像并列，也因为它的片面性，必然有着其他的表征事物内在的和伦理方面的图像；后面的这些图像将不会再阻止灵魂的提升，只要我们让其力学图像保持在适当的正确位置上。我们不会否认它的有用性，只要我们认识到，即使是最高贵的图像和概念，也不过是现象间彼此联系方式的图像，或是外部符号。

这也就消除了对于我的论述可能会提出的一种批评，即它们与宗教相违背。没有比把立足于全然不同和无比坚实的基础之上的宗教概念，与我们关于外部事物的踌躇不定的主观图像联系起来更荒谬的做法了。我将是最后一个提出这里所论及的观点的人，假如它们危害到宗教的话。而我相信，这一天将会到来，那时所有的人都会认为，这些观点与宗教的无关，就像地球是静止、还是围绕太阳旋转的问题与宗教无关一样。

这里，回顾玻尔兹曼论及宗教的另一段话并无不当。这段话可以看作是一个明确的泛神论宣言。我们可以在前面引用过的讲演《论无机界中过程的客观存在问题》(1897 年)中找到它：

的确，只有疯子才会否认上帝的存在；但同样，我们所有关于上帝的观念也都是不适当地拟人化了的，因此我们心目中的上帝并非以我们所想象的方式存在。这样，如果有人说他相信上帝存在，而另外有人说他不相信上帝，这两人可能说的是同一种思想，甚至于并没有怀疑它。我们必须不是去问上帝是否存在，除非在这么说时能确定地想象某物；相反，我们应当问通过什么观念，我们能够更加接近于包含了万物的最高概念。

科学哲学

当然，玻尔兹曼并没有把他的哲学兴趣限定于一般知识，而游离在伦理学、美学和神学之间。他对于科学哲学本身尤其感兴趣，如在前面所引段落中已经间接地表现出来的。他对于这一知识分支的贡献，确实表明了麦克斯韦的影响，以及在19世纪下半叶的德国所发生的对于科学的一般态度的改变，尤其是对于力学基础态度的改变。但玻尔兹曼的观点看来是清楚的和实用的，其意思是说他接受了新的观点，也接受了对旧观点的批评，就这些新观点能改进我们对于力学基础的理解而言，他的某些观点的新颖和现代性是令人惊奇的。而他最为关注的是原子假说问题。

我们这里最好不是按编年史的顺序，而是去追踪他的科学哲学教程的就职演讲(1903年)的开篇，其中也有着一个体现了玻尔兹曼风格的观念：

> 我迄今为止只写过一篇哲学内容的论文，而驱使我写这篇文章的缘由也纯属偶然。在科学院会议厅的一个场合，我卷入了一场与一组学者的最激烈的争论，马赫教授也在他们之中，争论的题目是新复活的关于原子论的理论价值。
>
> 我在这里顺便提一下，在这项由今天的讲演而开始的任命中，我在某种意义上是马赫的继任人，我确实应当由对他表示敬意来开始我的演讲。然而，我认为要表达对他的特殊的赞美实在是多此一举，不仅对于你们而言是如此，而且确实对于全体奥地利人，甚至对于全世界的知识分子而言都是如此。

于是，玻尔兹曼强调了事实上马赫本人曾有创见地提出过没有绝对正确的理论，同样，也很少有绝对错误的理论。它们中的每一个

都必然是逐步完善的，正如按照达尔文理论，有机体必然逐步完善一样。通过被有力地批评，理论可以抛弃不适当的部分，而适当的成分则保留了下来。由此，玻尔兹曼说在这个意义上，赞誉马赫的最好方法，是尽可能地为推进他的思想作出贡献。于是，他回到了与马赫的争论：

> 在关于原子论的争论中，马赫在这群学者中突然简洁地说：'我不相信原子的存在'。这一说法传到了我的脑海里。
>
> 在我看来很清楚，我们把一组感觉与关于对象，例如一张桌子、一条狗、一个人等等的观念联合起来。当我们形成新的与这些记忆图像非常相似的观念组时，去问相应的对象是否存在就成为有意义的问题。这里，我们把它作为存在概念的精确的量度。我们都准确地知道，希腊神话中的鹰头狮身带翅膀的怪兽，传说中的独角兽，或是我的一个兄弟是否存在这样的问题是什么意思。然而，我这么问自己，当我们形成全新的概念，例如空间、时间、原子、灵魂，甚至上帝的概念时，人们是否知道，问这些东西是否存在意味着什么呢？这里应做的惟一正确的事，难道不是该澄清一下诸如这些东西存在这样的问题，该与什么样的概念相联系呢？
>
> 关于这一类问题的讨论，形成了我惟一的一篇哲学论文。如你们所见，这是真正哲学性的，很深奥，至少与名字相称。除此之外，我在此领域一无建树。当然，这在很大程度上是过去的事；如果有人心存恶意，他可以到处去说，有些在大学教书的人，甚至连一篇与他本领域相关的可供发表的哲学片断都没写过。
>
> 然而，无论如何，它使我充满完全的谦逊之情。人们常说上帝赋予一个人以使命，他也会给此人以完成这项使命所需的才智。但教育部却做不到这一点；它当然能作出任命和确定薪俸，但它却不能给人以才智；因此，我只能自己来承担起这一责任。

现在，让我们回到关于热力学（或者如玻尔兹曼所说，热的力学理论）第二定律的演讲（1886 年）。在这里，我们看到：

> 或许有一天，原子假说会为某个其他理论所取代，但这是不可能的。
>
> 这里不必提出所有那些这么说的理由。不必去回顾汤姆孙的创造性的推理，他用最为不同的方法，以完全令人满意的一致性，求出了多少个这样单个的个体能组成一立方毫米的水。我也不必提及除了许多的化学事实之外，正是借助于原子假说，科学预先计算出了气体的摩擦常数与温度的依存关系、扩散和热传导的绝对和相对的常数，这完全足以与勒维烈确定海王星存在的计算，或是哈密顿对于锥形折射的预言并驾齐驱。

256

另一篇在理解玻尔兹曼对于原子假说的成功及其困难的估计上起着关键作用的文章，冠之以《论自然科学中原子论的必需性》的标题（1897 年）。在这篇文章中，我们可以读到下述段落：

> 当着现象学对于引力中心和刚体，对于弹性、流体动力学等等需要分别的和交互的，而不是不相联系的图像时，当今的原子论是所有力学现象的完全合适的图像；而在确定了这一领域的封闭性质之后，我们不相信还会有什么现象不适用于这一框架。确实，这一图像包括了热现象：这些现象不那么容易证明，不过是由于计算分子运动中遇到的困难。在所有的事件中，所有的关键事实都可以在我们的图像的特性中发现。此外，这一图像还被证明在表示下列现象方面是极为有用的，它们包括：晶体学事实、化合物中物质的比例不变性、化学同位素、极化平面的旋转和化学构成之间的关系，等等。
>
> 在其他方面，原子论仍然可以作进一步的发展。人们可以把原

子设想为具有任意性质的更为复杂的个体，例如矢量原子等……

在最后一段前面的一个长长的注解(注解 4)中：

这样，原子作为质点和力作为原子之间距离的函数的观点无疑是暂时的，但目前在没有更好的理论之前必须保留。

当然，基本的反思和经验告诉我们，想仅凭无目的的猜测，立刻就碰巧想出合适的世界图像，显然是毫无希望的；相反，它们总是缓慢地从几个幸运的观念的适应中浮现。因此，认识论有理由反对那些假说构造者的做法，他们希望不经努力，就发现能说明整个自然界的假说，也反对基于形而上学和教条主义的原子论。

另一个在科学模型中反对教条主义的有趣评论，可以在同一篇文章的另一个注脚中发现：

这么一种任意地归之于原子图像的特性是它们的不可变性。这种不可变性是对在有限时间跨度内观察到的固体的不可变性所作出的未经证明的概括。只要人们试图习以为常地在先验的基础上来证明原子的不可变性，反对这种特性就是有道理的。然而，我们把这种特性吸纳进这一图像，为的是使这图像能代表最大数目的个体现象，正如人们把一阶时间导数和二阶空间导数用于热传导方程，以便它能适应事实。在有些情形中，我们准备放弃不可变性，那儿有其他的假设能更好地表征事实。例如，在注 4 中提到过的以太的矢量原子，就并非不随时间而改变的。

因此，原子的不变性属于这么一种观念，它们表明自己是非常耐用的，尽管导出它的形而上学思考并不能经受无偏见的批评。然而，正因为这种多方面的用途，人类必须允许某种可能

性，就像所谓的辐射能，能由类似于表征物质的图像（即透明的以太是一种物质）来表征一样。

在圣路易斯的讲演（1904 年）《论统计力学》中，人们能读到相似的思考："这里，原子一词不应误导我们，它取之于古代，今天的物理学家不会把不可变性归属于它。"

如果说，如我们所知，作为科学家，原子理论并非玻尔兹曼的惟一兴趣之所在，那么当他论及科学哲学时，显然就更非如此。他的基本立场是模型在产生新观念和新概念时的有用性。他的观点清楚地表达在《通俗文集》的首篇之中，这篇文章的标题为《论理论物理学的方法》（1892 年）。在这篇文章中，人们在其他言论之外，会读到："法拉第的观念远没有那些有着数学上的精确性的早期假说清晰，许多旧学派中的数学家觉得法拉第的理论没有什么价值，然而，他们并没能由自己清晰的观念，做出同样伟大的发现。"

在另一篇题为《论近来理论物理学方法的发展》的演讲中（1899），人们可以读到对于实证主义的抨击：

现象学相信，它完全无需超越经验，就能描述自然。但没有方程能以绝对的精确性描述任何过程，而总是要把它们理想化，强调其共同的特性，忽略其不同之处，从而超越经验。如果我们还想有任何观念，从而允许我们预言未来的事情的话，这就是必需的，它来自于思维过程自身的本性，并如其所行地对经验有所添加，从而创造出精神图像；这种图像并非经验，却因而能表征更多的经验。

如歌德所说，我们的经验中只有一半曾经是经验。人们愈是大胆地超越经验，就愈能获取更普遍的看法，也就能发现愈惊人的事实，但也愈容易犯错误。因此，现象学不应为它没有超越经验而自豪，而仅仅应警告人们在超越经验时不应过度。

从这些言论中可以清楚地看出，在玻尔兹曼的心目中，什么才是一个物理学理论。但我们无需作任何努力去解释：在题为《论理论的意义》的演讲(1890 年)中，他非常清晰地表达了他的观点。在第一章中已引用过的开场白之后，他说：

> 如果我不一开始就问：什么叫理论？我就似乎不是一个真正的理论家了。外行首先看到的是，理论是很难理解的，并总是与公式纠缠在一起，而对于未入门者而言，这些公式说得根本不叫语言。然而，这并非理论的本质：真正的理论家总是尽可能少地运用公式；能用词语表达的，他总是用词语来表达，而正是在实验家们的书中，公式经常被过分地仅用作装饰。
>
> 我的一位朋友曾经定义实验家为对理论一窍不通的人，而理论家则是什么都不懂的热心人。这其中所包含的相当尖锐的观点，是我们同样要反对的。

玻尔兹曼的见解是：理论的任务在于构造外部世界的图像，这种图像完全是内在的，必须在所有的思想和实验中，作为我们的“指路星辰”；即如实际情况中那样，把它用在完成一个思维过程，用于每当我们形成一个局部观念时作为总体上的指导。

他认为，构造这样的图像，并使之逐步适应外部世界，是人类精神的一种特殊的动力。他接着说：

> 因此，如果我们不得不经常地运用复杂的公式来表征已经变得复杂的图像中的一部分，它们依然是非本质的，不是表示中最有用的形式；在我们看来，哥伦布、罗伯特·迈尔和法拉第是真正的理论家。因为他们的指路星辰不是实际中的所得，而是他们心目中的图像。
>
> 于是，这一图像的即刻的修改和不断完善，成为理论的主要

任务。想象始终是它的摇篮，而审慎的理解则是它的导师。

在玻尔兹曼看来，从毕达哥拉斯和柏拉图的起初的宇宙理论，直到黑格尔和谢林的理论，都是幼稚的，因为其想象过于活跃，而缺乏实验的检验。然而，他还是给了它们好评：

不足为奇，这些理论成了经验论者和实验家们的笑料，然而它们已经包含了以后时代中所有那些伟大理论的种子：哥白尼的理论，原子论，无重量媒质的力学理论，达尔文主义等等。

尽管有着所有这样的嘲笑，人们心中形成关于外部事物的理论图像的倾向仍然不可抑制，并不断绽放出新的花朵。就像哥仑布始终把航向确定为西方，这种倾向也始终不渝地引导我们朝向这一伟大的目标。

这些理论所缺乏的是合理的实验认识和操纵这些发明出来的众多装置和机器所需要的灵巧。一旦具备这些，古老和芜杂的想象结构就以惊人速度得以筛选和精炼，成为有益的和重要的自然模型。在此评论之后，玻尔兹曼说：

今天，人们可以断言，理论业已征服了世界。

谁不以赞美之情，看着那些亘古长存的星辰卑恭地遵从所有的那些定律，人类精神确实并没有给予这些定律，而只是从它们那儿掌握了这些定律。理论探索愈是抽象，它也就愈是强有力。假如对由公式来引导研究，而不是由研究引导公式依然有所怀疑，那么当我们得到一个算术定理，用数例来检验它时，我们甚至会更强烈地为这么一种感觉所萦绕，那就是这些数字总是毫无例外、不可避免地臣服于我们的公式。

然而，即使那些把理论评价为奶牛的人们，如今也不再怀疑

它的威力。难道说所有那些实验学科迄今为止仍未为理论所渗透，仍未尊奉理论为可靠的指引星辰吗？开普勒和拉普拉斯的形式不仅表明了星球天体运动的路径，而且与高斯和汤姆孙关于地球磁场的计算一起，为船只显示出在公海上航行的方式。伸展到视野之外的布鲁克林桥的巨大结构、高耸入云的埃菲尔铁塔，不仅依赖于锻铁的坚固框架，而且也有赖于更坚实的弹性理论。理论化学通过它们对于合成化学物的应用，变得更加丰富，更不用说电力工程师了！他难道不因下述事实而不断地对理论表示敬意吗？对他来说，除了英镑和便士之外，最熟悉的(单位)名称就是欧姆、安培，等等，而所有这些都是伟大的理论家；唉，这些人中没有人能像刚才提到的化学家那么幸运，因为他们的公式直到他们死后才在实践中卓有成果。的确，不用太久，这些伟大的电学理论家的荣耀就会体现在每张家庭的账单上，而到下个世纪，每个厨师都会知道烤肉要多少“伏特-安培”，他的灯是多少“欧姆”。

玻尔兹曼对于运用新近发明的仪器从事工作的技术专家的聪明也有话要说：

正是这些从事实际工作的技术专家，照例能比许多科学家小组更有把握地处理复杂的电学理论公式，因为他为自己的错误所必须付出的，不仅仅有要从教师处得到新证明的方法，而且还有硬通货。的确，几乎任何木匠或是金属加工者今天都懂得，掌握了画法几何、机器理论等等，会如何使他更具有竞争力。我也必须提到医学科学的广大领域，理论在这儿看来也正在逐渐生根。

这一段成了他所喜爱的话题——理论作为实践的工具——的导言：

人们总是试图断言，除了它的理智上的使命外，理论是可以想象的最有实践性的事物，仿佛是实践的精髓，因为其结论的精确性不可能为任何日常的估计、试验或错误所达到；即使给出了理论的隐秘方式，这也只能为那些完全把握该理论的人们所掌握。作图时的一处错误，可能放大为上千倍的后果，而一个实际工作者的错误决不会有那么大；正因为此，无疑总是会有这样一些情形，那些沉湎于他的思想，专注于普遍规律的思想家，会被聪明自私的实干家所战胜；阿基米德可以作证，他成为罗马进攻的牺牲品，另一位希腊哲学家也可见证，他正在观察星辰时，绊倒在石头上。让沉默压倒“它的用处是什么”这一类问题吧，它们通常是对于更为抽象的努力的责难。人们应当问的是相反的问题：“什么是这种追求的用处，它仅仅为了获得实用上的好处，就牺牲了那些其本身能使生活更有价值的东西，即理想的旨趣？”

然而，理论总是避免过高地估计自己；它的缺陷植根于自身的本性之中，而正是理论自身揭露了自己的错误；确实，苏格拉底已经把重点放在了认识自己知识的差距上。我们的所有观念都是纯主观的。我们关于存在和不存在的看法是如此地对等，这一点已由佛教所表明，它敬畏无，如同敬畏真实的存在。我称理论为纯粹精神内在的图像，我们看到这会带来多么高的完善程度。那么，当我们变得愈来愈沉浸在理论中，我们如何能不错过真正存在的图像呢？正是在这个意义上，黑格尔才说：很遗憾，自然不能实现其哲学体系的全部的完善。

因此，数学家常常会为他的公式心无旁骛，为他们的内部完善所遮蔽双眼，以相互关系为真实的存在，而把实在的世界撇在一边。于是诗人的如下痛惜正适用于数学家：他们的工作是用自己的全部心血写就的，而最高的智慧与极度的愚蠢搭界。

玻尔兹曼论科学革命

玻尔兹曼思想的一个重要方面，可以从下述纪念约瑟夫·斯忒藩的文字(1895 年)中把握，它表明，是玻尔兹曼首先提出了托马斯·库恩(1922～1996)关于科学革命的观点：

> 外行人可能会想象，新的想法和现象的缘由是逐步地添加到原有的基本想法上去的，我们的自然知识以这种方式，经历了持续的发展。但是这种看法是错误的，理论物理学的发展总是跳跃式的。在许多情形中，它需要几十年甚至上百年来全面地表达一个理论，使得关于某一类现象的清晰图像得以完成。但是终于，新的现象发现了，它们与这一理论不相容；尝试把前者吸收进后者的努力总是劳而无功。旧理论的追随者与全新概念的倡导者之间展开了斗争，直至后者终于被普遍地接受。从前，人们习惯说旧的观点已被认识到是错误的。这听起来像是说新的观念是完全正确的，而另一方面，旧的观点则是全然无用的。如今，为避免这方面的混乱，人们只是说：新的思想方式是对于事实的更好、更完备和更充分的描述。由此，下述观点得到清晰的表达：(1)较早的理论也是有用的，因为它给予事实以正确的、尽管是不完全的图像。(2)不排除新的理论也依次为更合适的理论所超越的可能性。

同样的论题在前面所引的演讲《论近来理论物理学方法的发展》(1899 年)中也有探讨：

> 对于理论发展所遵循的道路的仔细考察，揭示出它决非如人们所想象的那样是连续的，而是充满着断裂，至少明显没有沿着最短的逻辑路径。有些方法常常在前几天还提供最可观的结

果，许多抱着良好愿望认为科学的发展无穷无尽的人，不过是着眼于其不断的应用。然而相反，这些方法突然暴露出它们自己已经山穷水尽，从而尝试去发现其他全然不同的方法。在此事件中，在旧方法的追随者与新方法的拥护者之间会展开斗争。前者的观点被对手称为是过了时的和应用过度的，而它的支持者反过来则贬斥创新者为真正经典科学的败坏者。

附带地说，这种过程决非仅局限于理论物理学，而是几乎发生于所有的人类精神活动分支的发展史中。因此，许多莱辛、席勒和歌德时代的人可能会认为，由这些大师的实践所不断推进的理想的诗歌模式，已经提供了永恒的戏剧文学。而今天，人们在寻求完全不同的戏剧诗歌，而其适当的形式还没能发现。

唯其如此，旧的绘画流派正遭遇着印象派、脱离派、外光派的冲突，而古典音乐则遭遇着与未来音乐的冲突。这种最新的时髦不是依次也已经过时了吗？因此，我们无需惊诧，理论物理学也不会例外于这种一般的发展规律。

在同一篇讲演中，他进一步说：

由此可见，我们的任务不是去发现绝对正确的理论，而是尽可能地简单和尽可能准确地表征现象的图像。人们甚至可想象两个完全不同的理论，二者都同样简单，同样地与现象相一致，由此二者尽管不同，却同样是正确的。断言一个确定理论是惟一正确的，只不过表达了我们的不可能有另一个同样简单和合适的图像的主观信念。

这样，玻尔兹曼看来是提出科学学科是以两种状态交替发展的第一人：一种是相当连续的状态(库恩的术语为常规科学)，另一种与发现与既有理论不相容的现象相关，这些现象不顺从于科学家吸收它们

的努力(库恩的术语为危机)。而当玻尔兹曼说到“旧理论的追随者与全新概念的倡导者之间展开了斗争，直至后者终于被普遍地接受”时，他说的不正是库恩所称的科学革命吗?

尽管对于这些问题的浓厚兴趣在过去的30年中是科学哲学中的基本特征，这一情况在库恩的工作和I.B.柯恩的内容丰富的论述中都未能得到反映。第一个注意到这一奇妙情形的是E.什伊贝，他还讨论了玻尔兹曼的概念在许多物理学家著作中的发展(突出的是W.能斯特，见第十一章)。

事实上，玻尔兹曼对于哲学贡献的一个令人吃惊和不可否认的方面，在于它们依然为大多数20世纪的哲学家所未知这一事实。在这一点上，我们可以援引卡尔·波普尔(1902～1995)的一段很能说明问题的话，他本人就出生地来说，也是一位奥地利人：

> 玻尔兹曼作为一位哲学家是鲜为人知的；直到最近，我对他的哲学也才可说是略知一二，远逊于我所应当了解的。而就这些我所知晓的而言，我赞同他的哲学，或许远甚于其他任何一种哲学。因此，我极为推崇玻尔兹曼，而不是马赫，不仅是作为一位物理学家和哲学家，而且我承认，是作为一个人……迄今为止，玻尔兹曼的实在论和客观主义既没有为他本人，也没有为历史所证明(对于历史就更糟)。

265

另一方面，波普尔回到了我们在第五章中讨论过的所谓“策梅罗回归佯谬”，来批评玻尔兹曼的物理学，尤其是针对玻尔兹曼对策梅罗的回答。让我们来回顾一下，依据玻尔兹曼的计算，即使对一立方厘米的气体，“在时间中回归”所需的时间也是无法想象地长，用年数来表示的数目为10^{18}的数量级(对比于按现代的估计，宇宙的年龄所需的数字为10^{17})。或许波普尔在玻尔兹曼的思想(摇摆于其大胆和优美之间)中察觉到一个理论的实例，

它可以在概念上，却不能在实际中被证伪(谁能在这么长久的时间之后，来证伪一个理论？)。他不去注意到这一事实，而是指责玻尔兹曼为唯心主义。然而，我们面对的不是唯心主义，而是我们前面偶尔指出过的一个事实：一个宏观的仪器，尤其是人那么大小的观察者，在一个由极其微小的分子组成的世界里，只能观察到统计平均的事件。

玻尔兹曼所受的哲学教育

从我们的引文来看，玻尔兹曼显然是一位非教条主义的实在论者。或许是追随波普尔的说法，有时有人说科学上的困难导致玻尔兹曼放弃了实在论，这显然是出于误解(只有教条主义的实在论者才不会为人们所误解)。

我们在下一章中将进一步讨论这一点，在此之前，我们必须问自己一个问题：玻尔兹曼受过什么样的哲学教育？

一位勤奋地研究了玻尔兹曼的思想的传记作者 E. 布罗达毫不迟疑地说："我们看到，玻尔兹曼在哲学上是一位自修者。或许他与他的物理学家同行讨论过他的哲学观点，但在他大部分的生活中，奥地利不存在重要的哲学学派。" A. D. 威尔逊在一篇文献丰富的文章中强有力地抨击了这种看法，人们在这篇文章中可以读到：

> 然而另一方面，没有人能合理地承认布罗达关于玻尔兹曼早期没有接触过也没有兴趣于哲学的说法。保存在林茨的预科学校和维也纳大学的文件都表明布罗达完全是错误的。如我所已经提出的，也如我们在下面将看到的，玻尔兹曼决不是一个哲学自修者；因为他的确在学生年代系统地和正规地学过哲学。

威尔逊于是着手说明玻尔兹曼在林茨预科学校的(带有详细的哲学

课的教科书上的引文)和在维也纳大学的课程表。至于后者，如果人们考虑到维也纳大学数学系和物理系的学生必须注册哲学系的课程这一事实，就不会为发现玻尔兹曼注册了十门哲学课而吃惊。我们可以推断，玻尔兹曼高中时可能预先接受了非常好的哲学教育，就像直到30年前在欧洲的文科专业的高中生所还能受到的一样。的确，他对于唯心主义哲学家，更一般地说，对于他那个时代的德国哲学的反应，与刚刚描述的那样的学生并没有什么不同，如果再赋予一种科学态度的话，如我们在《自然哲学的就职演讲》(1903年)中能读到的：

> 不仅在写作我惟一的哲学论文时，而且在其他时间也是这样，我经常思索哲学的广大领域。它似乎是无穷尽的，而我的能力是微小的。把整个生命投身其中以获取些许成果，也不过是杯水车薪。一位教师从青春勃发到皓首之年，也不足以把哲学传授给未来的一代，那么我能把它与另一专业并列以作为辅助的职业吗，即使那个专业也已须穷我毕生之力？
>
> 席勒说过，人随着他的目标而成长。亲爱的老席勒呀！我恐怕人并不能随着他更高的目标成长。
>
> 当我对挑起这副重担心存疑虑之时，我被告知他人也不会比我做得更好。这种安慰在我正要负起这份重任之时，是多么的微不足道。
>
> 然而，现在把我压倒的东西，不也确实能让我重新站立起来吗？如果我这个很少陷入哲学思索的人被认为是最有资格来讲演它的人，这不是一种双重的荣誉吗？
>
> 如果可以称心的话，医学教授或工程学教授应该在教学的同时继续参加实践，免得思想僵化。的确，如果毛奇(1848～1916，曾任德国军队总参谋长——译注)被任命为柏林科学历史学部的成员，因为他没有书写但却创造了历史，那么或许我也会被选择，不是因为我曾写过逻辑，而是因为我属于这门科学，它

提供了在严格的逻辑中从事日常实践的最好机会。

即使不无犹豫，玻尔兹曼还是听从了干预哲学的召唤(尽管如他所注意到的，哲学家业已更为经常地干预到自然科学之中)，

他们现在已侵入我的领地多年，而我却甚至无法理解他们的观点是什么，因此我希望改进对于所有哲学的基础理论的知识。为了直插纵深，我读了黑格尔；我在那儿发现了怎样的含混空洞的语词洪流！我的晦气星座把我从黑格尔又引到叔本华。在他的第一本书的前言中，我发现了下述段落，我原原本本地抄录于此："德国哲学带着来自其他国家的屈辱而承受着重负，被从高贵的科学中驱逐出来，就像一个……"我隐去了下面的一些话，鉴于有女士在座。"……眼下这一代学者的头脑都被黑格尔的胡言乱语搅乱了。不擅思想，粗野，麻木，他们堕落到听任浅薄的唯物主义所折磨，这种从蜥蜴的蛋中爬出的观点到处充斥。"我对此当然同意，除了我发现叔本华本人也确实应受到他自己棍子的一击。

的确，我们已经看到，玻尔兹曼想用什么样的标题来敲击叔本华！

在同一篇演讲中，我们读到：

形而上学似乎对人类的精神施加了一种不可抵御的魔力，所有那些揭去其面纱的尝试的失败，都没能减弱其魅力。哲学探索的动力看来是根深蒂固、人类天生的。不仅罗伯特·迈尔是一位彻头彻尾的哲学家，而且麦克斯韦、亥姆霍茨、基尔霍夫、奥斯特瓦耳德以及其他许多人也志愿献身于它，并把它的问题看作是最高的问题。因此，形而上学在今天仍然被描绘为科学的皇后。

或许，我们能以一种所罗门[1]式的方式，对布罗达和威尔逊两人的观点都表示赞同。玻尔兹曼与今天的(尤其是年轻的和/或美国的)物理学家相比，有着一种特殊的哲学训练，但也确实是一种在他那个时代的中欧并非不可能发现的水平，因此他被认为是一位自修者。作为一个类比，我们会想起法拉第实际上是一位物理学中的自修者。

玻尔兹曼放弃了实在论吗?

在结束本章之前，讨论一下以下问题似乎是适当的：19 世纪末时的对于分子运动论的反对意见，是出于这一理论所遇到的理论上的困难，还是由于哲学上的原因？一个相关的问题是：作为这些哲学上的困难的结果，玻尔兹曼是否放弃了实在论？

关于前一个问题，似乎为科学史家和科学哲学家所普遍接受的观点有时有利于第二种解释，如为 S. G. 布拉什所总结的：

> 回想起来，这一时期对于分子运动论的批评似乎显然主要不是由于技术问题，例如多原子分子的比热问题，而是对于机械论或“唯物论”科学的一种普遍的哲学反应，而更偏爱经验论的或现象论的理论，就像对原子模型的反对一样。

然而，在 20 世纪 70 年代，一种不同的观点被提了出来，认为对于分子运动论的反对必须归因于它所遇到的困难。事实上，P. 克拉克说“是与热力学的成功相比，分子运动论纲领的退化，说明了科学实证论的兴起”。另一方面，M. R. 加德纳主张在对于原子论的接受中，有着一个从工具论到实在论的逐步转变。为方便读者起见，我们解释一下，按照工具论的观点，物理学理论不是说明，而是一种数学命题

[1] 古以色列王国国王大卫之子，以智慧著称。——译注

系统，旨在以一种简单、完备和精确的方式来表征一组经验定律。几年以前，J.尼霍夫彻底地考察了这一问题，并称概括在这一定义中的态度为哲学工具主义，以相对于方法论工具主义，后者指一个作为实在论者的科学家的实践，而把理论仅仅作为工具来使用。因此，尼霍夫论证说不无理由认为，加德纳的主张是毫无意义的，如果说的是哲学工具主义的话；但这种主张也可以是可理解的和有帮助的，如果我们指的是方法论工具主义，即如果保持在实在论范围中来谈的话。

当马赫关于力学发展的著作发表之后，他对物理学家的哲学影响也增加了。在提出了最有价值的几个见解的同时，他也提到，不存在力学说明，并且在这方面走得很远，例如说到："但是现在，……在更为严肃的判断发展起来之后，百科全书派的世界概念在我们看来就像是一个力学神话，与古代宗教的泛灵论形成对照。"这是对于分子运动论的公开一击，也可以说明玻尔兹曼在他的气体理论讲义第二卷前言中的激烈言辞：

> 正是在这个时刻，对于分子运动论的攻击开始增加。我确信这些攻击仅仅是立足于误解，而气体理论在科学中的作用还没全部发挥。……我意识到是在以个体的微弱之力，抵御时代的潮流。但依我的能力仍能作出这样的贡献：当气体理论再度复活时，无需去重新发现太多的东西。

这里，回忆一下这点是适当的，即受到马赫影响的最著名的科学家是爱因斯坦。他的证言和评价值得引录于此：

> 是恩斯特·马赫，在他的《力学史》冲击了这种教条式的信念；当我是一个学生的时候，这本书正是在这方面给了我深刻的影响。我认为，马赫的真正伟大，就在于他的坚不可摧的怀疑态度和独立性；在我年轻的时候，马赫的认识论观点对我也有过

很大的影响，但是，这种观点今天在我看来是根本站不住脚的。

在这一段文字之前，爱因斯坦回顾了19世纪的几乎所有物理学家是如何把力学看作是全部物理学的基础的。而在所引的这段文字之后，他以分子运动论为例，指出马赫的哲学不能公正地评价一些理论。

我们现在趋于与尼霍夫一起得出结论：我们在第八章中讨论过的与多原子分子气体比热相关的困难，与对于分子运动论的反对没什么关系。实证主义和类似的哲学与分子运动论的说明所立足的原理相冲突，由此，这理论才是哲学上要反对的。

然而，正如H.W.德·雷格特在最近的一篇文章中指出的，当两个事件(在我们的例子中，分子运动论通俗程度的降低和实证主义哲学的兴起)同时发生时，很难区分原因和结果：我们只能论证它们是相关联的。德·雷格特文章的主要点是克拉克和尼霍夫二者都同意把哲学看作起着一种外部的作用。然而，他论证说，说到麦克斯韦和玻尔兹曼，他们在这一阶段的科学方法和哲学立场是相互联系和彼此影响的。他首先详细分析了麦克斯韦的哲学观点。麦氏本人从未系统地表述过他的这些观点，因此，他的这些观念是从分散在麦克斯韦著作中的言论和评论中重建的。然后，德·雷格特考察了玻尔兹曼的哲学观点，我们在前面已经详加论述。他发现这两人都是实在论者、机械论者和唯物论者，但指出他们的根本不同，在于对于玻尔兹曼来说，理论在先，而经验实在只是第二位的；但依麦克斯韦的科学观点，肯定是相反的秩序。作为一个事实，在科学史家和科学哲学家的文章中，关于玻尔兹曼是否抛弃，或是削弱了他的实在论立场，存在着相当的混乱。照布罗达和尼霍夫看来，他从未放弃实在论，而克拉克、埃耳卡纳和希伯特以一种多少强硬的形式，坚持相反的观点。按照德·雷格特的观点，这一问题可通过仔细区分人们谈论实在论的三种层次(本体论的，认识论的，方法论的)来解决。无疑，玻尔兹曼是一位本体论层次上的实在论者：这只要回忆起在本章

开始时所引用的关于贝克莱的论述和他对马赫现象论的反对就足够了。在这方面，玻尔兹曼与麦克斯韦的观点是非常相似的。

理论的解释问题是认识论性质的问题。关于不可观察的实在能知道些什么？我们已经引用过玻尔兹曼的一段关于理论任务的文字。他对赫兹的观点作出了一些让步：理论是与现象相联系的精神性建构的图像，好像“名称的符号”。德·雷格特提出称他的立场为建构实在论。我们前面已用过非教条的实在论这一词，出发点本质上是相同的，即这种实在论不应阻止我们自由地接受创造出的实在模型，即使在同一时间这样的理论不止一个。

事实上，当我们说到方法论层次时，玻尔兹曼与麦克斯韦相反，论辩说经验世界过于复杂，如果人们把它作为科学工作的出发点，就不能走得太远。几个理论可以同时存在，适用于不同目的。只有它们的繁殖能力是检验标准。这种理论多元论亦为希伯特所强调：理论就像达尔文进化论中的物种一样，必须竞争以争取生存，但它们也发现了一种共同生存的方式。这种观点也为上面引用的文字所支持。在这种意义上，玻尔兹曼的哲学更接近于波普尔的观点，如波普尔自己所乐于承认的。

德·雷格特也提出了麦克斯韦和玻尔兹曼的哲学如何影响他们的科学工作的问题。他通过考察他们对于气体分子运动论所作出的贡献，尤其是第八章中讨论过的比热反常来这么做。主要的论证基于对玻尔兹曼关于双原子分子比热的比率说明的抵制。确实，我们注意到，这是麦克斯韦的分析的一个令人吃惊的特征。显然，麦克斯韦是受了光谱学数据表明刚性分子没有意义这一情形的引导。而玻尔兹曼用来回答的句子，或许就来自 1895 年，他证明为什么可忽略振动自由度时，所作的更为大胆的说明(见第八章)：

> 人们可能会反对说，以上不过是一系列尚未完美地证明的假说。但姑且承认其不可几性，只要表明这一说明并非不可能就

足够了。因为这样，我已证明这一问题并非不可解，而自然就可以发现比我的解更好的解。

我们迄今尚未讨论马赫的传记作者J.布莱克莫尔的一个重要的但却是有争议的贡献。这篇文章的主要论题，是玻尔兹曼的文章中对于马赫的认可。

布莱克莫尔对于玻尔兹曼和马赫的观点进行了广泛的评价，尤其是他承认，马赫及其追随者通过劝阻使用原子论，阻碍了科学的进展。但是他认为玻尔兹曼采纳了马赫的科学哲学以战胜马赫的科学方法论。布莱克莫尔的分析的主要特点，是强调玻尔兹曼工作中的语言哲学，并声称玻尔兹曼的科学哲学变得比马赫的更加现象论。布莱克莫尔实质上宣称玻尔兹曼最终在认识论和本体论层次上，都放弃了实在论。他引证了玻尔兹曼关于自然哲学的就职演讲，我们已读到过其中的一些文字。他集中于下述段落：

这里，我有着一种梦魇似的感觉，这是一个悬而未决的困惑：我究竟何以存在？或世界何以能存在？为什么它正是如此，而不是别的样子？在我看来，能够成功地解决这一困惑的科学是最伟大的科学，是真正的科学皇后，我称之为哲学。

我获得愈来愈多的自然知识，我吸取了达尔文的理论，并从中认识到，以这种方式去问一个不能被回答的问题确实是一个错误，但是这个问题总是以同样强制性的力度再度涌现。如果它是不合理的，为什么它总挥之不去呢？如果在它之中并无意蕴，那么火星或天狼星的一颗行星上的风景如果未被生物感知，就真的不存在吗？如果所有这些问题都毫无意义，为什么我们无法消除它们，或我们怎么样做才能最终使它们归于沉寂？

布莱克莫尔论证说，玻尔兹曼似乎在寻求的不是解决本体论或形

而上学问题的方式，而是像一位“马赫主义”哲学家那样消解它们。他进而说玻尔兹曼未能在真与确定性之间作出区分。

现在，我们到了布莱克莫尔论文中最有趣的部分，这出现在他的这样一段评论之后，即玻尔兹曼重新定义哲学为一种语言学进路，从而能使我们甚至避免去问形而上学的问题。布莱克莫尔继续评论说，在此方面，玻尔兹曼的基本文献是他在圣路易斯的关于统计力学的演讲。我们前面的引证清楚地表明，这一演讲仅仅是口头上触及了题目中的主题，实际上是要求哲学抛弃形而上学。我们已经对这些文字有所评论，但玻尔兹曼确切的话语在这里：

> 我目前的理论是完全不同于那种认为有些问题是在人类认知领域范围之外的观点的。因为按后一种观点，这是人类认知能力的缺陷或不完善，而我把这些问题的存在和它们自身，都看作是一种幻觉。……因此，如果哲学能成功地创造出一个体系，使得在所有提到的情形中，它都能清楚地坚持：当一个问题未能证明其合理性，提问它的动力就会逐步消褪；这样我们就一举消除了最为模糊的谜团，哲学也才能配得上科学皇后的称号。

布莱克莫尔称这为极端疗法，并把玻尔兹曼的理想哲学与《爱丽丝漫游奇境记》中的红皇后相比，她喊叫“砍掉他的头”！但玻尔兹曼认为这是治疗人类认识的途径。

布莱克莫尔问自己：那么，这是一个玻尔兹曼选择以保护自己的科学工作的策略，还是他真的相信自己的这些说法？然后，他承认长时间以来，他认为玻尔兹曼是一位实在论者，但他也说他可能错了。他实际上认为，玻尔兹曼是想把唯心论与实在论者之间的差别削减为不过是语言上的差别。在考察了对于贝克莱和叔本华的不友好的评论之后，布莱克莫尔得出的结论是：玻尔兹曼像马赫一样，对于形而上学(这个词在这里的用法或许不同于本章第一节中的定义)和

思辨有一种非理智的和过分的恐惧，而其结果使他成为一名唯心论者（并没有意识到它）。

然而，就玻尔兹曼的情形而言，本书作者认为这是不能令人信服的。确实，玻尔兹曼指出过许多问题可以还原为定义问题。但显然这一点是必须的：或者我们认可在讨论中，当两人用某一词时或表述时，他们意指同一件事；或者我们必须澄清词语或表述的涵义。这种分析可以表明，分歧是纯字面上的，或纯主观的。科学离日常生活愈远，这种分析就愈有必要。我们建构某些图像或模型以说明现象，我们必须在模型与我们的知觉和实验之间作出一种对应。作为真实世界的客观存在的热情倡导者，玻尔兹曼的这种信念达到了考虑改变我们的逻辑规则的程度，如果它们与我们的实验发现不一致的话。

同样正确的是，玻尔兹曼稍许变动了他的哲学立场，而并没有告知他的听众或读者（我们看到他甚至在科学事务中也曾这么做）。但是，他热情地参照达尔文的进化论以作为哲学基础，可作为他的实在论的试金石。

布莱克莫尔把玻尔兹曼的哲学划分为三个时期（直到 19 世纪 90 年代为实在论，直到约 1904 年为现象论，或马赫式的唯心论，直到去世为语言哲学）。从前面的论述，显然我们很难赞同这种观点。布莱克莫尔的一个有趣的看法，是玻尔兹曼绝非任何类型哲学的真正的信仰者，这一点当然我们将永远无法知道。

我们当然已经指出，必需给“实在论者”这一名词加上一个修饰语，因为这一词的使用有着许多不同的意谓（布莱克莫尔给出了实在论必须满足的四项条件，对第四项条件又有着 10 项次一级的条件）。我们觉得，我们把玻尔兹曼描述为“非教条主义的实在论者”是有道理的。

当然，我们必须在玻尔兹曼与他对某些哲学家的影响之间作出区分。实际上，布莱克莫尔的文章最有价值的部分，就在于他阐明了玻尔兹曼作为许多现代语言哲学，尤其是维特根斯坦的观念的奠基人

或教父的作用。然而如果说玻尔兹曼试图把一切都还原为语言问题，或否认我们能论及超越表象和意识的物理世界，更别说去理解这个世界，就完全是夸大其词了。这对于维也纳学派，逻辑实证主义，以及他们的追随者，当然是真实的。

在结束本章时，我们注意到玻尔兹曼对于其对手的认可，甚至于使他的物理学家同行自 19 世纪 90 年代早期开始也感到混淆。但我们能坚持乔治·哈特雷·布赖恩的见解，他说玻尔兹曼的观点“看来已经被解释为一种不同于他明确主张的见解”，而且他确信“玻尔兹曼教授会非常震惊于得知，他的见解现在广泛地传播和引用为一种权威，以承认气体分子运动论不过是一种纯数学研究，其结果并不与物理现象相符；简言之，不过是一种无用的数学游戏。”显然，玻尔兹曼的非教条的实在论，和他的非常现代的理论作为实在的模型的观念易于为人们所误解。因此，我们同意布赖恩的说法：“我想，他的观点并不像分子运动论的反对者们所愿意保持的那么悲观。”

第十一章

玻尔兹曼与他的同时代人

玻尔兹曼与其同事们之间的交往

在前面的几章中，已经论及玻尔兹曼与几位同时代的伟大科学家之间关系的若干重要方面。在第一章中，我们回忆了他的导师约瑟夫·斯忒藩，是他向玻尔兹曼介绍了麦克斯韦的文章；回忆了他获准的休假，从而得以在海德堡与本生和柯尼希斯伯格，在柏林与基尔霍夫和亥姆霍茨一起工作；回忆了他与约瑟夫·洛喜密脱的友谊，与H. A. 洛伦兹、H. 亥姆霍茨、J. 瑞利、W. 奥斯特瓦耳德以及他在慕尼黑的同事(冯·迪克、普林斯海姆、隆美尔、泽恩克、纳伊尔、泽利格和林德)之间的交往。我们已经不止一次地遇到过恩斯特·马赫的名字，并遇到过几次黑尔姆的名字。我们也提到过他的学生保罗·埃

伦菲斯特、弗里茨·哈泽内尔、斯忒藩·迈尔、莉斯·迈特纳、斯文特·阿伦尼乌斯和沃耳特·能斯特，以及他与布伦塔诺的交往。其他偶尔出现过的名字有吉布斯、彭加勒、普朗克、赫兹和策梅罗。

据信，玻尔兹曼的思想是与他那个时代的科学相隔绝的。而事实上，他的科学立场在他的世纪那个科学研究构架中是相当个别和几乎孤立的。在本章中，将探讨这种情形的客观状况和形成原因。

麦克斯韦

让我们从上面提及者中最伟大的物理学家开始。据迄今为止之所知，玻尔兹曼与他并没有直接的接触，无论是当面接触，还是通信。我们在这里当然指的是J.C.麦克斯韦，他通过在电磁学和分子运动论方面的杰出工作，也通过他的关于物理学模型的思想，对玻尔兹曼的工作施加了持久的影响。出于明显的理由，我们将限于讨论气体分子运动论的发展，这一理论的现代形式几乎全部应归功于这两位伟大的科学家，而目前我们要讨论的，正是他们之间的关系。首先，我们要关注的，是在第三章和第四章中业已讨论过的若干方面。麦克斯韦于1860年首次在分子运动论领域出现，运用了两年前为克劳修斯所引入的平均自由程概念。如果我们谈的是一位能力较低的科学家的话，他在此文中的贡献，可称得上是相当成功的首次亮相。事实上，他不仅系统地发展了输运过程的理论，而且首次提出了计算分布函数的问题，并以一种独创性的方式解决了它。尽管从逻辑的观点，这种解法有着种种局限性，但却充分显示出强有力的直觉所能取得的成果。正是在这篇文章中，我们首次遇到了现在所称的麦克斯韦分布。

然而，麦克斯韦立刻认识到，平均自由程的概念作为分子运动论的基本工具是不适当的，尽管它有着定性的和启发性的意义。事实上，他写作了几篇立足于这一方法的手稿，却从未发表它们。相反，他发展了一种全新的方法，于1866年发表于他关于分子运动论

的最重要的工作。我们说的是输运方程方法，这一方法以他的名字来命名，并成为玻尔兹曼1872年所写的基础性论文的动力泉源。麦克斯韦论文的目的，在于写出可描述任何分子速度的函数的平均值随时间演化的方程。平均是借助于分布函数进行的，然而它却不再能一般地称之为麦克斯韦分布了，因为后者只描述了平衡态。在同一篇论文中，麦克斯韦发现了分子模型的特别简单的性质，按照这一性质，分子是质点(因而非硬球)，它以与它们之间距离的五次方成反比的斥力相互作用(这些虚构的粒子通常称为麦克斯韦分子)。他也对他的统计平衡态中气体中的速度的分布函数公式作出了更好的辩护。

在考虑到随它们的距离的 n 次方的倒数而变化的斥力，并注意到描述碰撞效应的项包含着两个碰撞分子的相对速度 V 的 $n-5/(n-1)$ 次方后，麦克斯韦以下述简单的语句，引入了冠以他的名字的分子："可以表明，由关于气体黏滞性的实验，我们有理由相信 $n=5$。在此情形中，V 将从表式中消失……而它们立刻可以被积分。如果我们假设 $n=5$…"。然后，他立刻着手积分，这可以无需知道分布函数——这是关键的一点——而做到。这种情形允许他根据不断给出的分子间力的强度来计算出输运系数(事实上，这一计算并不那么容易，需要运用椭圆函数)。麦克斯韦所提到的实验在前一章中已经作过描述。

麦克斯韦用他的输运方程几乎已经得到分布函数的一个演化方程，但这最后一步，无疑必须归功于玻尔兹曼，如我们在第四章中所见。在写作他的基础性论文前，玻尔兹曼已经学会如何运用麦克斯韦的技巧，而到1868年，他已经把麦克斯韦分布拓展到分子在保守力场中的平衡态情形，也包括多原子分子的情形。这一结果在数年后也为麦克斯韦所独立发现。麦克斯韦是知道这位年轻的奥地利科学家的活动的，因为在他最后的文章之一中，他明确地把这一结果和分布函数 f 的演化方程归功于玻尔兹曼("玻尔兹曼已经表明，函数 f_1 必须满足方程……")，并评论说它只有在特定的情形中有解。他后

来说："然而，我们将假设对于玻尔兹曼来说，f" 近似地等于麦克斯韦分布乘以一个多项式。由此，他成功地发现了由温差而引起的应力。麦克斯韦的这篇文章也是非常重要的，因为应审查人的要求，他增加了一个附录，并在其中首次讨论了玻尔兹曼方程的边界条件。

在麦克斯韦和玻尔兹曼的关系中，有着一个独特的情形：前者从未提到过 H 定理，即由玻尔兹曼方程所能得出的最重要的成果。这一忽略的原因是什么呢？我们不能相信麦克斯韦的洞察力不足以估价玻尔兹曼结果的重要性。是由于这一定理的引用不适合于他 1879 年的论文吗？抑或是他忌妒玻尔兹曼的已经得到"热力学第二定律的纯粹力学的证明"的声明，而麦克斯韦完全了解概率在这一定律中所起的作用？或许答案非常简单：他只读过——如果读过的话——1872 年论文的一部分。这样，麦克斯韦于 1879 年所引用的玻尔兹曼文章要么应归于部分的阅读，要么应理解为是提及当时广为人知的事实。我们甚至可以毫不犹豫地倾向于第二种假设，如果我们注意到麦克斯韦 1879 年论文中的两段，其中引用了玻尔兹曼的贡献，却并没有准确的相应论文出处，正如许多提到过的其他作者一样。对这一解释的进一步支持来自一段麦克斯韦 1873 年致泰特的信，即在参考文献的一年之后，我们在第七章中已经引用过它：

> 关于玻尔兹曼的研究，我就无法理解他。他因为我的简短而无法理解我，但他的冗长对我来说，也同样是绊脚石。因此，我非常愿意与令人愉快的取代者作伴，并把全部内容放进六行的篇幅中。

麦克斯韦写的另一篇文章中也提到过玻尔兹曼的工作，实际上在文章的标题中就包含着玻尔兹曼的名字。这篇文章在许多方面是值得注意的，特别是我们在其中发现了第一次把麦克斯韦-玻尔兹曼分布作为常能量球表面的均匀分布的极限——当自由度的数目趋于无穷时——来直接计算。

洛 伦 兹

在玻尔兹曼同时代的科学家中，能够阅读和深刻理解他的论文，直至指出其中的错误(如我们在第八章中已经看到的)，并进而把他的方法推广到电子理论领域的人，是亨德里克·安东·洛伦兹(发音为“劳伦斯”)。

洛伦兹(1853～1928)比玻尔兹曼大 9 岁，志趣相似，却有着全然不同的生活。在 24 岁时，他被聘为乌得勒支大学的数学教授。他放弃了这一职位，却申请在莱顿的一所高中当教师。一年以后，他就任于莱顿大学新设立的理论物理学教授。直到约 45 岁时被玻尔兹曼邀请而出席杜塞尔多夫会议，在此之前，他都未曾因为科学的原因离开过荷兰本土。尽管如此，洛伦兹却能流利地使用德语、法语和英语。他能正确地用这些文字写作，也能运用意大利文通信。

让我们暂且停顿一会儿，来评述玻尔兹曼这一把洛伦兹引入德国物理学家世界的邀请。洛伦兹被要求在第 70 届德国科学家和艺术家大会上，任选主题作一次演讲。玻尔兹曼的邀请信的日期为 1897 年 10 月 13 日，会议计划为第二年的 9 月份召开。这一邀请改变了洛伦兹的生活，自此往后，他很少有哪一年不到国外出席会议或作演讲的。玻尔兹曼的邀请与洛伦兹的变化之间的关联，也可在后者女儿的回忆中得到佐证：“我很少看到过父亲有像他从这次会议回来后那么好的精神”。

洛伦兹的电子理论拓展了电子科学的领域，使得最终必需修改我们的空间和时间的概念，以使其结果与实验相协调。第一篇揭示出新概念的论文由洛伦兹于 1892 年发表。所有的电磁现象被归因于它们的源泉，即运动的电荷。这一概念并非是全新的，因为它曾为韦伯、黎曼和洛伦兹本人在较早的工作中提出过。然而，在此前的理论中，电子被假设为能以依赖于其电荷、相互距离和速度的力超距作用，而在洛伦兹 1892 年的论文中，电荷载体假设为不是直接相互作

用，而是通过它们置身于其中的媒介(以太)来相互作用。然而，他的以太的性质远不同于有重量的物体；尤其是看上去更像为麦克斯韦方程所描述的空的空间，被赋予了某些动力学性质。当保罗·德鲁德(1863～1936)开始研究固体导体中的电子运动论时，洛伦兹借助于他在分子运动论方面的深刻的知识，提出了一种在当时代表着伏于其他各种理论的方法。只有新的统计方法，才产生出更好的理论，而这是在20年之后的事了。

洛伦兹在其20世纪的同辈人中的地位，或许由阿耳伯特·爱因斯坦(1879～1855年)作出了最好的描述，他三次谈到了洛伦兹：第一次(1927年)涉及洛伦兹对国际交流所起的推动作用，第二次为在洛伦兹墓前的悼词(1928年)，而第三次是在莱顿为纪念洛伦兹百年诞辰所作的祝词(1953年)。在这些文字中最后，我们读到：

282

> 在世纪交替的时候，所有国家的理论物理学家都认为H.A.洛伦兹是他们的精神领袖，这是理所当然的。我们这个时代的物理学家多半没有充分了解洛伦兹在理论物理学基本概念发展中所起的决定性的作用。造成这件怪事的原因是，洛伦兹的基本观念已深深地变成他们自己的观念，以致他们简直不能完全体会到这些观念是多么大胆，以及它们使物理学的基础简化到什么程度。

如随后的文字所表明的，爱因斯坦这里所提到的是电子论。这一理论的成果是那些为物理学家所熟知的术语，如洛伦兹变换，洛伦兹－斐兹杰拉德收缩，洛伦兹力，洛伦兹不变性，洛伦兹规范等。

我们也必须提到洛伦兹曾成功地工作于其中的另一个领域，即流体力学。他写出了关于缓慢的粘滞流动和湍流的论文，并于1918年(在65岁的年龄)成了数学工程师和海洋学家。事实上荷兰政府曾要求他担纲一个委员会主席，以研究计划中的巨大水坝的效果：拦截须得海，这是他的祖国所曾进行过的最大的工程项目。八年之后，委

员会作出了他们最终的报告，它包含着后来被证明为极有价值的预言：而正是洛伦兹承担了设计模型的重任！ 我们提供了魁肯的论文作为欲知详情的参考资料。

现在，让我们讨论洛伦兹与玻尔兹曼的关系，我们并非没有注意到，上面所引的爱因斯坦那段话中的最后一句也同样适用于玻尔兹曼。

如我们在第八章中所提到的，在收到洛伦兹指出他的错误的手稿后，玻尔兹曼(在 1886 年 12 月 11 日)感谢了他，并(于 1887 年 1 月 1 日)承认了自己的错误，同时(在他的第一封信中)也表达了洛伦兹对于他的工作的兴趣所给予他的快乐："我极其高兴地从你那儿，发现了一位致力于发展我的关于气体分子运动论的思想的人。 在德国，实际上没有人能同样地理解这些事情。"

几年以后，当洛伦兹写作一篇稀溶液的分子理论的论文时，玻尔兹曼写了一篇论文，其中对范特霍夫的渗透压定律进行了推导，而这一题目也为洛伦兹所关注。 玻尔兹曼的证明非常简单，但包含了一个未经证明的假设，如洛伦兹在一封日期为 1890 年 12 月 16 日的信中所告知玻尔兹曼的。 玻尔兹曼着手写了另一篇论文，在其中纠正了这一错误，并寄了一封日期为 12 月 21 日的回信给洛伦兹，其中没有任何勉强，包含了下述引人注目的语句："从邮票和书写，我意识到此信来自于你，并使我有着一时的欢乐。 真的，每一封你的来信都意味着我犯了一个错误。 但我从这些情形中学到了许多，以至于我甚至愿意犯更多的错误，以便收到更多来自于你的信。"

让我们也回忆起洛伦兹(而不是一位母语为德语的科学家)曾于 1907 年在德国物理学会面前，对于玻尔兹曼所作的纪念。 关于这一致辞，我们只引用下面这一句：

由玻尔兹曼讲述的旧学说(见第二章一开始时所引段落)现在已生长出强壮的新芽，我们应感谢他的努力；即使这些旧学说外表已经改变，并且肯定在时间进程中还会变化，我们仍然能希

望：它们绝不会为科学所遗忘。

玻尔兹曼与唯能论者

在评述了玻尔兹曼与就方法论和物理理论的观念而言，与他最为接近的两位伟大科学家之间的关系之后，现在相反，我们必须来讨论那些与他观点极为相异的人。我们在前面的一些章节中，已经看到了玻尔兹曼是如何强烈地反对那些唯能论的支持者，这些人是19世纪末德国物理学的真正“主教”，随时准备把反对他们教义的人逐出教会。

所谓的“唯能论”的支持者们把莱布尼茨看作是他们的奠基人。事实上，如我们在第二章中所见，人们可以把能量概念回溯到或许是为惠更斯所影响的他(尽管在前面提到的章节中所引的段落中，莱布尼茨明确地指出，只有借助于原子假说，才能正确地理解能量守恒)。但如我们在第二章中再次所见，所讨论的这一概念在19世纪业已完全成熟。唯能论最伟大的支持者奥斯特瓦耳德把罗伯特·迈尔置于这一理论的现代奠基人的首位：“他能成为一个真正的唯能论者、一位具有现代精神的唯能论者的原因，在于他不喜欢假说”。事实上，迈尔是继莱布尼茨之后，像谈论一种物质一样谈论能量的第一人。奥斯特瓦耳德走得甚至更远：

> 如今，如果物理学家或化学家想显得更为时尚，他就会宣称物质和能量是两种类似的或并行的实体，并定义物理科学为这两种不可摧毁的事物——物质和能量的转换的科学，而不知道在大多数情形中，他只不过是在重提迈尔的概念。后面会看到，人们必须不要把这一概念看作是确定的，即使是物质-能量二象性也是可以被超越的，如果在这情形中，物质的定义甚至不是一个很好的选择的话。显然，精神-物质二象性同时也消失了，而产生的问题是要知道能量与精神的关系是什么。正是在这儿，在

这组概念中最值得重视的进展发生了——就科学而言，这两个概念是同一类的，精神的观念随着能量的观念而产生。

那么，奥斯特瓦耳德是如何看待在澄清和传播能量概念中起了重要作用的焦耳和亥姆霍茨，又是如何看待首先说到唯能论的兰金的呢？ 所给予的句子是决定性的：多余地执著于以中心力相互作用的质点模型。 兰金惟一的功绩在于他

观察到大多数不同能量都可以被表示为两种其本性明显不同的要素的产物，各种能量概莫能外。 如果我们称一种要素为强度，而另一种为广延，这就是说任何种类能量的两种要素之一具有强度的本性，另一种有广延的本性。 兰金以一种相当特殊的形式提出了他的觉察，但尽管如此，这在构建普遍的唯能论理论中还是起到了非常重要的作用。

在思考唯能论概念的实际意义之前，我们注意到它的主要领袖奥斯特瓦耳德是一位化学家。 现在，尽管化学家随意地谈论着原子和分子，但广泛流传的观念却认为，它们仅仅是些并不存在的东西的表象。 他们似乎认为科学只有放弃这些表象才能发展。

我们可以从约翰·道尔顿(1766～1844)开始，他的《化学哲学的新体系》可以看作是标志着近代化学的诞生，因为它把所有种类的物质还原为有限数目的元素(在那时只有 18 种)。 他称我们叫分子的东西为原子，而这种术语上的混淆在 19 世纪上半叶及其后是相当普通的，因为道尔顿不承认我们在第二章中已经提到过的阿伏伽德罗于 1811 年提出的假说，这一假说以非常精确的方式，确定了分子概念，其表述为，在确定的压强和温度下，同等体积的不同气体包含有同等数目的分子。 在同样于第二章中提到过的 1860 年于卡尔斯鲁厄举行的首届国际化学家会议上，在其议事日程的顶端，我们发现了这一讨

论：在表述“分子”和“原子”之间是否应作出区分……甚至更为有趣的是未能达成一致这一事实。其时年纪虽轻，却已颇为著名的奥古斯特·克库勒·冯·施特拉多尼茨(1829～1896)坚持物理分子和化学分子不是一回事。在他的发言之后展开的讨论中，我们在第二章中已遇到过的斯坦尼斯劳·坎尼札罗评论说这种区分没有实验基础，因而是不必要的。在他自己的发言中，坎尼札罗强调了阿伏伽德罗的原理对于化学的重要性。30年后，德米特里·伊万诺维奇·门捷列夫(1834～1907)回忆起“通过这次会议，阿伏伽德罗定律得到了广泛的发展，在此之后很快征服了所有的心灵”。

我们会想起威廉·普罗特(1785～1850)，他第一个提出了大胆的假说：实质上所有元素都由同样的材料所组成，因为原子重量可以被表示为一个基本单位的整数倍。就连他也认为原子理论不过是一个惯用的技巧，非常方便地应用于多种目的，但并不能代表自然。

奥斯特瓦耳德已经掌握了对于化学非常有用的热力学概念，他加入反对原子论的战斗，不过是件自然的事。他主要的论证实质上就在于洛喜密脱佯谬。但他本应知道得更多些，因为雅可布·亨里克·范特霍夫和约瑟夫·阿基利·勒贝耳已经于1874年独立地用分子立体化学说明了一些化合物的同质异能性。

宣称能量是实在的，只不过是一个可接受的信念，然后就必须用能量来说明一切，尤其是力学原理、物体的质量，等等。如今，这些事情比较容易，但用19世纪可获得的概念工具却是不可能的，而玻尔兹曼正抓住了这个机会。他尤其指责黑尔姆和奥斯特瓦耳德在力学和热力学中的混乱的和错误的推导。

玻尔兹曼的第一次回答以《关于唯能论的数学表达》为题，首先指出当时时代的潮流，是尽可能清晰和自由地从假设出发，去构造现象的描述，并能产生精确的定律：这是基尔霍夫、亥姆霍茨、克劳修斯(在他的广义热力学中)、赫兹、汤姆孙(开尔文爵士)、吉布斯等人为他们自己设定的目标。

玻尔兹曼说，与此平行地存在另一种潮流，其倡导者们并不否认对方的兴趣，而旨在继续以极大的成功，去摹画弹性现象、流体力学、光现象、热现象、电磁现象的模型。按其本性，这些模型是不完备的，但总能导致普遍的定理，只要足够的努力，这些定理能够产生一个证明，或是一个像哈密顿原理、热力学第二定律、麦克斯韦-赫兹电磁场方程这样的形式体系。

然而，一种新的潮流正在兴起：

> 最近，一些科学家认为他们能摆脱这些复杂状况，以一种非常简单的方式来表达基本定律。因为在最终的分析中，他们只承认能量的存在，并称自己为唯能论者。我们忽略了我们自己目前的自然概念是否是最适当的；为获得比今天的理论物理学更普遍和更高的观点而作的仅有的努力于是得到彻底的证实。但当今的唯能论者并不限定自己于这样的努力：他们相信自己已经达到了更高的观点，并认为在理论物理学中盛行的表达方法因而必须被完全放弃，或至少按他们的基础原理来修改。我认为我能在下面对此观点加以驳斥。

在说到他在唯能论者中有着许多朋友，他很钦佩他们的有着不同性质的论文，不想对这场讨论做出个人的歪曲之后，玻尔兹曼声明，黑尔姆为自己设定的目标，即仅由能量守恒推导出力学方程，即使在单个质点的情形(黑尔姆表示了不同形式能量的平衡，把运动点的坐标看作是独立变量)下也是不可能的。奥斯特瓦耳德选定了同一问题，但限定自己于提示一种线索。玻尔兹曼试图以一种综合的方式来说明奥斯特瓦耳德的思想，把它们归结为三条看来毫无矛盾的原理：第一条原理说的是力学系统被赋予的总能量，为动能(仅为速度的函数)和势能(仅为位置的函数)之和；第二条原理是说如果在某一时间瞬间，系统中的所有质点处于静止，其后的无穷小时间中，他们

的运动方式为尽可能多的势能被转换为动能(这表达的确很不清楚，但它就是这么说的)；第三条原理是如果质点在一确定瞬间总是在运动，它们随后的运动方式将总是按照前一原理所获得的能量，来增加它们的速度。玻尔兹曼也说到人们可以赞同普朗克：对于质点运动，能量原理对于运动在每一坐标轴上的投影也成立。然而，他表现得好像比教皇更神圣一样，接着说道：

> 但这些论述都不满足唯能论的允诺。事实上，在开始时，他们基于假设物体是由质点组成的，按唯能论的精神，这构成了某种对于我们思想自由的未加保证的限制。我不知道对于刚体运动的欧拉方程、弹性方程和流体力学方程，仅靠唯能论原理，而无需运用原子假设，就能做出什么直接证明。进而言之，这些论述对于我们关于力学原理的知识并没有产生任何进步；它们并没有引入在其他领域中也同样成立的一般性定理，而是并不怎么成功地通过限制力学基础，来给其附加上某些部分地转换为唯能论语言的东西。(从势能到动能的)最大转换原理尽管人们希望它是普遍的，但被证明为只有有限的意义，因为它只能应用于从静止开始的短暂运动中。把叠加原理拔高至自然的普遍定律的地位，在我看来是不成熟的……最后，当几个质点起作用时，由质点通过其运动所提供的功的分离在我看来也是任意的。

如果按照奥斯特瓦耳德的更为高级的形式，人们承认只存在能，而无需任何物质支持它，在热能情形中这看起来使问题简单了，但在运动能情形中却并非如此。实际上，我们应当总结它的空间分布的规律，由此来恢复其质量概念，来定义速度为 $(2T/m)^{1/2}$。玻尔兹曼于是开始了热力学中唯能论的详尽讨论，表明唯能论者尤其是黑尔姆，又一次采用了吉布斯在通常观念框架中所发现的成果，并把它们以一种任意的形式普遍化。玻尔兹曼说，唯能论原理至多不过能应

用于非常缓慢的运动；奥斯特瓦耳德对第二定律的表述事实上比通常的形式所受的限制更多。

玻尔兹曼接着回顾了奥斯特瓦耳德1895年在吕贝克的演讲，说：

> 他通过形象和一般性思考来论述，对此我们应避免表达意见，因为它们尽管精彩，却既没有证明，也没有确认任何东西。但严格逻辑的错觉对许多人施加了如此大的说服力，使得对这一演讲的至少某些部分的严密考察是有意义的。我认为这种考察是非常必需的，因为有许许多多的年轻人正倾向于去获取不同领域的唯能论者所许诺的轻松收获，而不想去掌握在理论物理学中卓有成效的数学工具。

奥斯特瓦耳德对于基于原子和力作为最终实在的拉普拉斯的决定论图景的批判，被认为是没有人愿意再加以支持的东西。事实上，玻尔兹曼说：

289

> 应当说，没有人还认为力是一种实在，或认为人们应致力于证明一组自然现象服从于力学说明……我也曾经诉诸普遍的力学机制为原因，但我这么做仅仅是因为我想表明它对于以往所接受的神秘的说明的巨大优越性。那种认为说明自然的惟一途径，有赖于彼此之间有着超距作用的质点图像的看法，在奥斯特瓦耳德的说法之前，就几乎是全体一致地被放弃了。今天，我们已经明显地更加谨慎：这种表征对于我们仅仅是一种我们不应崇拜的图像，它或许能够被完善，但也可能我们不得不全然抛弃。这一图像仍然是我们最感兴趣的，因为它是我们所仅有的，并且能在某些重要的方面得以发展，以与实验相一致。

玻尔兹曼说，因此，科学家们达成一致，致力于追寻尽可能摆脱

任意假设的描述。这一趋势可以从麦克斯韦那儿发现，他关于光学原理的立场类似于奥斯特瓦耳德、赫兹和英国首相索尔兹伯里，甚至在分子运动论中也是如此，在那儿，分子不再被认为仅仅是质点的聚集，而是为广义坐标所定义的未限定系统。他继续说：

> 这样，我们有必要扩大每一种观点的视野。但奥斯特瓦耳德试图用以表明传统的理论物理学的表示不再能被证明，因此我们必须选择唯能论表示的所有论证，在我看来都是站不住脚的。
>
> 的确，通常的理论物理学方法还有漏洞，还远不能对所有现象提供一个完全清楚和一致的描述。但对唯能论而言就更是如此。“我们自身应当否认任何实在图像。”但人类的思想与这些意象有什么不同吗？只有对上帝，我们不应有，也不可能有任何图像。

玻尔兹曼继续进行关于唯能论的哲学思考，讨论了为奥斯特瓦耳德所再次采用，以反对热力学第二定律的力学解释的可逆性论证：

> 奥斯特瓦耳德断言，由于力学微分方程的时间完全可逆性，世界的力学观念不能说明为什么自然进程总是发生于特殊的方向上。在我看来，由于这种方式，人们忽略了这一事实，即力学不仅为微分方程所限定，也同样为初始条件所限定。我已经以一种与奥斯特瓦耳德的观点直接对立的方式表明，力学论(机械论)的一个最惊人的确证，正在于它给出了一个能量耗散的极好的图像，只要我们承认世界起始于一个对应于某些初始条件的初始态，我把这些初始条件指定为一种不可几状态。这里，我限定自己通过一个相当简单的例子来表明这一思想……

他接着谈到开始时分离的白色和黑色弹子的混合过程：

> 同样的过程也发生于宇宙中，如果它起始于原子的秩序和它们的速度都表现出某种规则性的状态：机械力总是趋于引发摧毁这些规则的一些变动。那种在其中规则性可能产生的方式，正像原子和它们的定律在其中会产生的方式一样，几乎不起作用。

自然的力学描述，如果说它是可能的，遇到了非常困难的问题，这是它经常失败的原因。一些已经被放弃的假设在说明某些定律时仍然是有用的。最古老的假设也在科学中留下了它们的脚印，因而以某种方式生存下来；没有一种理论能完全取代先前的理论。人们可以引证的例子有麦克斯韦方程出现之前的电磁流体理论和光的波动理论。玻尔兹曼的结论是：尽管遵循基尔霍夫、克劳修斯、亥姆霍茨和吉布斯的榜样，追求一个尽可能不为特定假设所限制的自然描述是方便的，但唯能论的表示迄今为止被证明为并非恰当的，并且可证明在教学上是有害的。除了其一般形式外，力学物理的模型依然是非常有用的，依然应当被煅造为一种不仅是研究工具，而且是分类、描述清楚的和记录我们的思想的工具。发展得较为成熟的物理学的支持者，远不会相信传统的思想形式的永久性和完备性，也远不会对每一种新的尝试抱有偏见。但是革新者也同样应当小心，在他们获得真正的成功之前，不要把已经证明了其价值的思维方式评判为荒唐的。去问当今哪一种思维形式更适合于未来是毫无道理的。关于这一点，唯能论的发展很有可能会证明对于科学是非常有用的。但那些错误地把自己看作是吉布斯的继承人的唯能论的斗士，却并没有遵循他的道路。

奥斯特瓦耳德和黑尔姆对玻尔兹曼的这一篇相当长的论文作了回答，而马赫正忙于他的关于热力学的著作的出版(1896 年)，但在针对唯能论的透彻有力和压倒性的攻击面前，他们的回答只能表现得苍白无力。玻尔兹曼接着又回之以题为《关于唯能论》的论文，其中他在开始时这样说：

像眼下的这种关于唯能论讨论的进行，并不期望得出结论说一方是对的，而另一方是错的，而旨在澄清观点。因此，我将满足于关于唯能论和力学之间关系的结果。黑尔姆的最近一篇论文（《维德曼年鉴》1896 年第 57 期第 646 页）看来把一切全都说清楚了。

普朗克和黑尔姆（如现在已证明为同时地）已经表明，通常的质点系的运动方程能从能量原理中得到，如果我们假设它分别对于每一个坐标方向上的每一个粒子成立，或按照黑尔姆，在无论什么方向上都成立的话。

另一方面，黑尔姆在通过质点的正交坐标转换和作用于其上的力的转换，以获得拉格朗日方程以及整个力学上走得太远，而其本身又牵涉到要预设物体是质点系统。但这一预设显然又一次把我们带回到原子论领域。由此，按已知方式，对于在并非均匀作用于所有粒子的力的影响下的持续运动，必然产生粒子间不规则的相互运动，而这总会耗去一部分可见的运动能；如果运动足够剧烈，粒子交互运动，会使物体液化；这样粒子必须从表面分离，使物体产生蒸发。

附带说来，这些原子假说也承认能量的概念为其最重要的概念之一；确实，如果你愿意，它们可以由能量概念通过适当的辅助假设而得出。然而，如果唯能论者以它们没有得到充分的证明为借口，不承认这些假说，就会走上一条完全不同的道路。

到底如何从运动的能量是第一位的而运动物体则是派生的这一假设出发，去构造整个力学，我眼下还真不能想象。而如果唯能论采取舒坦些的途径，从质量概念出发，然后为避免原子假说，它就必须假设物质连续地占据其空间。由能量原理，加上适当的辅助假说，于是人们首先要获得刚体的运动方程，或许无须绕道经由组成物体的单个质点的坐标，不必经由作用于它们的力。通过新的辅助假说，人们必须由弹性能和流体力学的能

量，推导出相应的运动方程。所有这些确实如此不同的推导应当是可能的，按照列出的这个或那个辅助假说，而且我把去尝试这些推导看作对于科学是有益的。

看起来更为困难的，是从纯粹唯能论的观点出发，去考察所有情形，其中力学能量被转换为热、熔化和蒸发现象、气体和蒸汽的性质，等等，而这些现象正是通过分子理论和热的特殊力学理论，才变得如此易于理解。

唯能论要解决所有这里所列出的问题，看来还有很长的一段路要走。显然，在此之前，无法判断为唯能论所需要的辅助性假说能如何地直观，也无法在整个力学范围内将它们与分子理论相比较。

玻尔兹曼还继续评论道，“……只有从唯能论立场出发，达到对于热力学、化学和电学的基本轮廓的清晰的、无可辩驳的表述，才有可能确认唯能论对于吉布斯理论作出了怎么样的实质性的新的进展。”

在校改中，玻尔兹曼补充说他已经看到了 H. 奥斯特瓦耳德的回答，从中似乎看不出后者想把能量作为力学中的首要概念，如玻尔兹曼自己认为的那样，他说

他提出从物质的某些性质中推演出物质，但他保留了旧的力学中的概念，从质量入手，并定义能量为 $mv^2/2$。……

奥斯特瓦耳德本人相信他的途径，也没有偏离那些我绝不会怀疑的东西。然而，关于所谓原子论的贫乏，许多化学家也并不同意，因为他们习惯于直接从业已形成的关于原子位置的图像，来推演出同分异构化合物的数目和极化平面的旋转性质。就我而言，我想指出吉布斯在为他的定理作辩护时，确实必须运用分子观念，即使他无法把分子引入计算……最后，最近的电化

学理论也始于纯分子理论，能斯特由此得出溶解压。只是到了后来，这些表述才与它们的分子证明分离开来，表现得像是纯粹的事实。另一方面，气体理论的数学部分所主要追求的目标，是数学方法的进一步发展，对于其在实践中应用的评价则从不是决定性的。纯粹实验家请略过这一段，并请克制自己的批评欲望。

在总结本章关于唯能论的这部分讨论之前，我们应当提一下马赫和奥斯特瓦耳德在佩林给出了原子存在的清楚的证据后(见下一章)的反应。在发表于1909的他的《普通化学基础》第四版的前言中，奥斯特瓦耳德完全转变了他的观点，如我们从下述句子中可以推测的："我现在相信，我们最近已经拥有了物质的分立或粒状性质的实验证据，对于这样的证据，原子假说已经徒劳地寻求了几世纪，甚至数千年。"

294

至于马赫，我们有着两种矛盾的说法。第一种见于1950年发表的斯忒藩·迈尔的文集。按此说法，为厄斯特尔、盖特耳和为克鲁克所发明的仪器使得有可能把单个 α 粒子所产生的闪光在屏幕上表现出来，当马赫于1903年看到此仪器的演示之后，他说："现在，我相信原子的存在。"但当他的著作《物理光学》于1913年发表时，他在前言中重申他不相信原子。而当爱因斯坦与他交谈时，马赫说他赞同原子理论对于物理学是最好的最有用的假设，而不必承认原子的"真实存在"。这就是S.布拉什在报告这些事实时，要给相关的章节冠以"死不改悔的无赖"标题的原因。

普 朗 克

在玻尔兹曼的同代人中，我们还可以提到马克斯·普朗克(1858～1945)，尽管他几乎要年轻15岁。普朗克经常被认为是更具现代性的科学家，因为就在20世纪的黎明降临时，他获得了世界范

围的荣誉。事实上，我们在前面的章节中，在前面曾引述的玻尔兹曼的文字中，已经遇到过他的名字。在这两位科学家之间，还有着一层传记上的联系：正是普朗克获得了玻尔兹曼所拒绝了的基尔霍夫在柏林大学的教授职位。

正像圣保罗在前往大马士革的路上一样，普朗克是在他的黑体辐射研究中，是受了以玻尔兹曼统计方法的形式出现的神启之光的照耀和启迪的。如他自己所真诚地承认的，普朗克的角色是一位马赫哲学的叛道者。他成为马赫哲学的最严厉的批评家之一。而在技术层面上，普朗克只是说他不认为马赫具备关于热力学第二定律的足够的知识，马赫关于热力学的书只会导致对于热力学的肤浅的把握。普朗克反对奥斯特瓦耳德，并在吕贝克争论之后不久，就写作了一篇题为《反对新唯能论》的猛烈抨击奥斯特瓦耳德的思想的文章。我们来看一看他写于 1904 年和 1909 年的两段。他在前者中写道：

> 尽管我相信这一事实，即推展到其全部的逻辑结论的马赫体系不包含任何内在的矛盾，但我也更相信这一事实，即这一体系毕竟只有一种纯形式的意义；它不能够深入到科学的真正本质，因为它与任何科学研究的本质特征不相干，这种本质特征就在于要构造严格稳定的、独立于世代和人群的差异的关于世界的图像。

即使用严格稳定的极端属性来描绘一种永远不变的科学看来似乎太过分了，它也还是可以接受的，只要人们理解它指的是一种不可达到的理想，这种理想可以通过试错法不断趋近，但永远不可能达到。然而，后面的文字看起来更为明确：

> 如果马赫的经济原理真的要放在每种知识理论的中心，那些将要诞生的天才会发现它对于他们的思想只会是一种障碍。他们想象的翅膀将会瘫痪，科学的进展无疑也将会被以一种灾难性

的方式所损害。就此而言，让经济原理处于一种更有节制的地位难道说不是更“经济的”吗？

普朗克更进一步地称马赫为“虚伪的牧师”。“由他们的产物你就可以了解他们！”玻尔兹曼可以在他的学生中列举出 W. 能斯特和 S. 阿仑尼乌斯这两位诺贝尔奖金获得者，他的学生中还有 L. 迈特纳、F. 哈泽内尔、P. 埃伦菲斯特和其他许多杰出的物理学家，马赫能举出谁的名字？

下一段引文有助于同时说明普朗克的进展和玻尔兹曼在其生命的最后阶段，其工作所遇到的困难情形：

> 在上一世纪的 80 年代和 90 年代，个人经历告诉我，当一位研究者经过长期的思索得到一种思想，而想把它传播出去时，要耗费多少周折。他必须认识到，他为此目的而提交的最好的论证是如何的无足轻重，因为他的声音没有足够的权威性以影响到科学世界。在那些岁月里，要反对诸如威廉·奥斯特瓦耳德、乔治·黑尔姆、恩斯特·马赫这样的人，实在是一件徒劳的事。

学生和年轻的同事

现在，让我们来看一看下一代人，玻尔兹曼的学生或年轻的同事们，他对他们十分尊重。

我们从阿诺尔德·索末菲(1868～1951)开始，他于 1905 年被任命为玻尔兹曼在慕尼黑的继任人，在这一职位的空缺达几年之久之后。他是由玻尔兹曼和洛伦兹推荐担任此职的，洛伦兹是这一职位的首要人选，但他谢绝了这一任命。索末菲是一位伟大的教育家，在量子理论的早期发展中起了重要的作用。

其次，我们要回想的是瓦尔特·赫尔曼·能斯特(1864～1941)，

原先是玻尔兹曼的学生，因提出了所谓的热力学第三定律而闻名遐迩。按照这一定律，当绝对温度趋于零时，熵必须达到一个普遍值。他也是著名的索尔维会议的鼓动者，并继承了玻尔兹曼的科学哲学思想，尤其是那些通常会归功于库恩的物理学是跳跃式发展的思想。在他的发表于1893年的理论化学的教科书的引言中，他强调了理论研究的重要性，指出它能导致“新的知识，其正确性为只是随后才进行的实验所检验”，尽管理论家“总是处于为不幸选取的原理的虚幻眼光所误导的危险中。”在1911年的英文版序言中，能斯特提醒我们：

> 许多久为人们所认识到的定律必须经过修改，以满足知识进步的要求。……如果我们更仔细地思考这一问题，则显然所讨论的定律在广泛的范围内已经得到其有效性，但其适用的限度也被更明确地限定了。甚至于可以说，由于精密自然科学的发展，几乎没有一个为最高等的研究者所确立的定律不在全部的时间里保持其广泛的适用性，即没有在确定的界限内保留为可用的自然定律。例如，我们不能说光的电磁理论已经完全推翻了为菲涅耳和其他人所提出的旧的光学理论。相反，现在像从前一样，范围广泛的问题能用旧的理论加以适当处理。只有在一些特殊的情形中，后者才会失效；此外，在光现象与电现象之间确实还存在着许多关系，而旧的理论却并未涉及。因此，电磁理论意味着更大的进步，但这决不会取消旧理论的成功。……所以，不像花草树叶那样在时间进程中会枯萎凋谢，科学理论在确定的限制下，被赋予了永久的生命；每一时代的著名发现在进一步的发展中，无疑都要经受某些限制，但对于所有的时代，它都依然保留着真理成分的精髓。

能斯特论及我们对于自然的理性认识发展的革命性成分的其他方

面，可以从他发表于1922年的一篇论文中找到，其中明显地有着玻尔兹曼的方法和为广义相对论所带来的新的革命的影响。

另一个应提到的是斯万特·阿仑尼乌斯(1859～1927)，作为玻尔兹曼的学生和格拉茨大学的访问学者，他曾把气体分子运动论中的思想应用于化学动力学。

最后，我们应当回想起丽丝·迈特纳(1878～1968)，她也是玻尔兹曼的学生。如我们在第一章中已经提到的，她非常喜欢玻尔兹曼的课，并完全接受了玻尔兹曼的哲学观点。她从1902年到1906年，一直坚持听玻尔兹曼的课，并在以后回忆说：

> 玻尔兹曼在讲课时从不抑制他的热情，这很自然地使他的听众也投入进来。他也非常喜欢把完全个人化风格的评论穿插在他的讲课中——我尤其记得在描述气体分子运动论时，他告诉我们，他由于相信原子的真实存在，遇到了怎么样的困难和反对，他遭到了怎么样的来自哲学方面的攻击，而他并不总是了解反对他的是什么样的哲学家。……兰帕是一位杰出的实验家，但作为马赫的一位信徒，对物理学的现代进展持相当怀疑的态度。

这一段议论给我们提供了一条线索，从他们的学生的角度来看玻尔兹曼与马赫之间的对立。当然，他们当中那些不那么具备科学探究才华的人，会为玻尔兹曼以那么一种轻蔑的方式来谈论他同事的思想而烦恼或很不舒服。因此，身为玻尔兹曼女婿的路德维希·弗拉姆说：

> H.马奇坦承他在当时及以后的多年中都很难受，因为他有着像玻尔兹曼和马赫这样科学观点如此不同的两位老师。他认为如果不是马赫本人告诫他们实验物理学家不必过分在意认识论上的事，他会更为这种不和而难受。

加布里埃莱·拉贝尔是如此烦恼，他甚至写了一封信给马赫，看看玻尔兹曼对他的议论究竟是否是真的："从一位杰出的大学教授那里，我一再听到——今天又再次听到——把你描绘成一位感觉论者，或者甚至是一位心理一元论者，即一位认为世界只是作为感觉而存在的人，他把精神看作是惟一的实在。"为了让她平静下来，马赫在回信中说语言能以不同的方式运用和理解，但他显然并没能使她觉得好受些。事实上，在约20年以后，她发表了她与马赫的信，以表明马赫的思想如何为重要的人们所"误解了"。

关于玻尔兹曼观点的一个不那么尖锐的表述，可以在马赫的学生的下述陈述中发现：

> 众所周知，原子理论仅仅是一个图像，但他却坚持把它当作一个方便的假说。因此，他发现自己与奥斯特瓦耳德、马赫和大多数其他物理学家相对立。这些物理学家中大部分是唯能论者，而这意味着他们对物质的类型并不作特别的假设，却试图仅仅借助于纯粹能量概念去理解所有的物理过程。玻尔兹曼是物理学界最后(!)一位原子论的伟大的代表人物。

然而，在这两位当时奥地利最伟大的物理学家的观点之间，也有可能达成妥协。这里，是菲利普·弗兰克(1884～1966)的一些回忆：

> 非常奇怪，维也纳的物理学家都是马赫和玻尔兹曼的追随者。人们并不是由于马赫而厌恶玻尔兹曼的原子论。我甚至并不认为马赫有任何厌恶。至少他并没有如经常想象的那样，在其中起着重要作用。我总是对这些问题很感兴趣，但对我而言，从不存在由于马赫的理论而不去研究玻尔兹曼的理论这样的事。……常听说玻尔兹曼是由于马赫对于原子论的攻击，导致物理学家反对它而过度失望，因而结束了自己的生命。事实上

> 这不可能是真的，因为从哲学上说，玻尔兹曼就是他自己，而不是马赫的信徒。玻尔兹曼曾对我说过，“你看，如果我说原子论不过是一个图像，这对我没有什么关系。我并不在意这一点。我并不需要它们有绝对真实的存在。我并不这么说。马赫说要‘经济的描述’，或许原子就是一种经济的描述。这并不会过分伤害我。从物理学家的立场来看，这并没有什么影响。”玻尔兹曼的哲学观点并不需要你相信原子的真实存在。我想说的是，从马赫的观点出发，并不会反对玻尔兹曼的物理学。这种反对，这么说吧，只存在于哲学领域。

然而，人们会怀疑弗兰克不过是一个例外，而不是普遍情形。并且我们不知道他用玻尔兹曼的话说出来的，有多少是他自己的观点。这些观点更像是20世纪科学家的观点，这些科学家用马赫的传记作者J.T.布莱克莫尔的话来说，应贴上“玻尔兹曼式的马赫主义者”（以对比于“纯马赫主义者”）。

在结束本章之前，让我们回头再来谈谈丽丝·迈特纳。她导师的自杀使她前往柏林，并在那里在放射性研究方面做出了杰出的成就。在奥地利被德国吞并之后，她感到了不安全，于是接受了在斯德哥尔摩的职位，并在那儿度过了随后的22年。就在离开柏林之前，她与O.哈恩和F.斯特拉斯曼一起，发表了关于提供铀后元素最初证据的第一篇论文。几个月之后，丽丝·迈特纳和O.R.弗里什在《自然》上发表了一封信，宣告了核裂变的发现。

第十二章

玻尔兹曼思想对于20世纪科学技术的影响

布朗运动

玻尔兹曼的思想对于20世纪物理学的影响是显而易见的，即使它经常似乎是通过不同作者，主要是吉布斯、普朗克、爱因斯坦和埃伦菲斯特等的文章中表现出来。这种独特情形的原因，在第七章论述平衡态统计力学时，已经部分考察过了。对于那里所作的论述，可以添加这么一个事实，在他生命的最后岁月里，玻尔兹曼更多地致力于捍卫他的理论和他关于理论物理学的观点，而不是去系统地阐述他的发现和方法，或是应用这些方法于新近开辟的领域(电子理论，黑体辐射，布朗运动)。即使是他已发表的演讲，尤其是其中的第二卷，也更多地是致力于证明气体分子运动论的基本概念的有用性，而不是去强调它们的作者在理论发展中所起到的作用。如我们前面已提到过

的，有一些应用是玻尔兹曼意识到了的，但他却没有去做。或许最明显的例子是布朗运动，玻尔兹曼在几处提到这一运动，其中的一段在第十章中已经引用过，但他并没有去把他的像下面这样的评论进一步展开，以得出其推论："……同样，可以观察到气体中非常小的粒子进行着来自于这一事实的运动，即粒子表面的压强是会有涨落起伏的。"

让我们来概括一下这一奇异的布朗运动的历史。罗伯特·布朗(1773～1858)是一位伟大的植物学家，但我们不想在这儿讨论这一方面。1828年，他写了一本小册子，题为《于1827年6月、7月和8月所进行的关于植物花粉中所包含粒子的微观观察的简略记述；以及关于有机体和无机体中活动分子的普遍存在》。这个小册子即使后来曾经重印，也从未正式"发表"过。他描述了他对于浸泡于水中的花粉粒子的奇异的、不规则的运动的考察。他趋于相信他正在看到生命的"分子"，并且观察了动物和蔬菜组织的不同分子。所有这些都表现出相同类型的运动。后来，他开始怀疑这种运动与生命无关，对任何物质的粒子，从窗户玻璃的碎屑到一种狮身人面像的残片，都观察到了同样的现象。

他的微小粒子具有一种永久的运动的意见引起了怀疑。先后有过从光照到蒸发，从毛细作用到热转换等多种说明机制。法拉第在一次讲演中为布朗辩护，惟一不准确之处是使用了有着其他含义的"分子"一词。布朗又做了进一步的实验，以表明所提出的说明与该现象无关。

在起初的兴奋过去之后，对于布朗运动的兴趣消失了约30年。当气体分子运动论的发展达到了一定阶段，有人提出了布朗运动与分子运动的联系。然而，克劳修斯、麦克斯韦和玻尔兹曼都引人注目地并未参与这场争论。一位意大利物理学家乔万尼·康托尼于1868年写了一篇文章，宣称布朗运动是"热的力学理论的基本原理的美妙而直接的证明"。1870年，斯坦利·杰文斯，一位英国政治经济学和科学方法专家，断言布朗运动与渗透作用相关。布朗运动与分子

运动相联系的思想出现在几篇文章中，但没有人试图去进行计算。到 1879 年，德国植物学家卡尔·内格利试图否证这种联系，基本上用的不过是分子与布朗粒子之间在大小上的巨大差异，这会导致运动远远地慢于实际上观察到的情况。英国化学家威廉·拉姆塞于 1882 年也提出过同样的论证。然后，人们开始求助于坐标化的运动，其中法国化学家利昂·戈瓦伊指出，在任何情况下，布朗运动都会违背热力学第二定律。这导致彭加勒在圣路易斯会议(1904 年)的致词中作出如下重要评论："如果情形真的如此，要看到世界的向后回转，我们就不再需要无穷精细的麦克斯韦妖的眼睛；我们的显微镜就能给我们以充分的保证。"

对爱因斯坦的影响

对这一评论加以发挥，并得出一个理论以构成出发点，去确定无疑地弄清物质的原子结构，要留待爱因斯坦来完成。爱因斯坦自己说到过他的惊奇于这么一个事实：为什么这个成果没有为玻尔兹曼所获得。在一次谈话中他说到"令人困惑的是玻尔兹曼本人没有得出这个最明白的结论，因为玻尔兹曼已经奠定了整个问题的基础"。

关于上面所引的材料中，玻尔兹曼没有去追踪他关于布朗运动的评论这一事实的原因，我们可以从派斯的爱因斯坦传记中引用他对爱因斯坦的困惑的论述及评论："然而，很难想象严阵以待的玻尔兹曼，会表现出爱因斯坦在处理分子的实在性时的那种认真而又幽默的精神。"

这里，让我们注意到爱因斯坦在开始他本人关于统计力学的研究前，确实读到过玻尔兹曼的讲义。似乎有疑问的是他是否了解玻尔兹曼的论文。他后来确实弥补了这一空白，其结果是对这位奥地利科学家给予了很高的评价。关于第一点，我们可以引证爱因斯坦的自述：

在不知道玻尔兹曼和吉布斯的已经发表而且事实上已经把问题彻底解决了的早期研究工作的情况下，我发展了统计力学，以及以此为基础的热力学的分子运动论。在这里，我的主要目的是要找到一些事实，尽可能地确证那些有确定的有限大小的原子的存在。这时我发现，按照原子论，一定会有一种可以观察到的悬浮微粒的运动，而我并不知道，关于这种“布朗运动”的观察实际上早已是人所共知的了。

爱因斯坦对于玻尔兹曼的非常早的评价，估计是基于玻尔兹曼的讲稿，可以在一封给他的女朋友米列娃·马里奇的信中发现，他后来与她结了婚。此信写于一个星期四，可能是1900年9月13日于米兰，信中说：

玻尔兹曼是壮观动人的。我几乎已经读完了。他是一位阐释问题的大师。我坚定地相信这一理论的原理是正确的，这意味着我相信在气体情形中，我们真的是在与有确定的有限大小的质点打交道，它们在按照某些条件运动。玻尔兹曼十分正确地强调，分子之间的假设力并非理论的实质性组成部分，因为总能量是运动能类型的。这是朝着物理现象的动力学说明迈进的一步。

有些作者指出，在玻尔兹曼与爱因斯坦之间有过通信，但是如派斯的爱因斯坦传记中所说，不存在关于这一点的证据。在他的信中还提到过两次玻尔兹曼。在一封写于星期五，日期估计为1901年9月6日(显然当时的邮件投递是如此之快，忽略掉日期无关紧要)的给马塞尔·格罗斯曼的信中，我们可以读到：“近来，我正专注于玻尔兹曼关于气体分子运动论的工作，而近几天，我自己写了一篇短文，以提供由他开始的证明链条中的要旨……我可能把它发表在《物理学杂志》上。”

同一篇文章，较小的一篇，大概是在另一封给米列娃·马里奇的信中提到过，爱因斯坦在这封信中说会把这篇提到玻尔兹曼工作的文章的一部分寄给玻尔兹曼。或许就是这一句子使前述的作者们认为在这两位科学家之间有过通信。

我们在后面会更多地说到爱因斯坦的布朗运动理论。

关于第二点(即爱因斯坦获得了更详细的关于玻尔兹曼工作的知识，并且非常敬慕他)，似乎只须回顾这一点就足够了：在向更广泛的公众阐释相对论，一个与玻尔兹曼的工作根本不相干的主题时，爱因斯坦在导言中写道："我一丝不苟地遵循着杰出的理论物理学家L.玻尔兹曼的箴言，按照他的说法，优美雅致一类的问题应当留给裁缝和皮匠去干。"

黑体辐射

由于我们在第七章中说到过吉布斯，一位严格意义上的玻尔兹曼的同代人，现在我们应该通过论及玻尔兹曼对于普朗克的影响，来更详细地来讨论他对于以后物理学发展的影响。普朗克对于黑体辐射理论的贡献——这是在19世纪末和20世纪初做出的——以一种双重象征的方式，开辟了随着玻尔兹曼的最重要活动时期即19世纪后30年而来的物理学的新时代。而普朗克的工作的确是连接玻尔兹曼和量子力学的纽带。

在1896～1899年之间，分五部分发表了关于黑体辐射的工作后，普朗克在以相同题目所写的进一步的论文(出现于1900年)中，提出了他的结论。文章一开始，基于对策梅罗佯谬的深刻印象，他写道：

无疑，分子运动论涉及……用保守效应，即作为无数分子间所有碰撞的结果来说明趋向于热力学平衡这一任务，这些分子被想象为通过保守力相互作用的点。但更精确的研究表明，为气

体分子运动论所假设的这种分子运动，在这种表示的任何意义上，都并不具有时间方向；而且以一种完全一般的方式，任何曾经存在的状态在时间进程中，都会以一种满足所需的近似程度的高频率再次发生。从气体分子运动论的观点出发，我们不会得到任何严格的粘滞性理论，除非我们使用一些附加的假设。

在声明了分子运动论的失效之后，普朗克指出，他自己希望把带有时间方向的变化还原为保守效应："我相信，我必须把在激发它的波中作无摩擦和无阻力振动的谐振子的影响，看作是一个由完全保守效应组成的有趋向的过程……"事实上，这种谐振子会改变这个场，例如通过从平面波中吸收能量，再以球面波的形式重新放射出来，或是逐渐地消除涨落，或者甚至通过改变频谱。此外，由于系统拥有无穷的自由度(因为它包含了场)，也就避免了策梅罗佯谬。

在他的工作的前三部分中，普朗克遵循了这一路线(我们可称之为"反玻尔兹曼的")。在此，我们的目的不是要去详细考察普朗克论述的方式，这在相对新近的时间里，已经被仔细地分析过了(见库恩的专著)。因此，我们想详述的，是普朗克思想的发展中，那些与本书主题相关的方面。

在普朗克工作的第一部分提交柏林科学院四个月以后，玻尔兹曼向柏林科学院提交了一个简短的批评。这篇文章在认识到普朗克所获得的公式的巨大价值的同时，指出这些公式所借以发展起来的纲领是注定要失败的。实际上可逆性佯谬(玻尔兹曼对它显然是熟悉的)仍然保持着其全部的有效性。不引入适当的(即使是高度可几的)初始条件，就不可能由可逆的方程中推导出一个不可逆的方程来。

在注意到这一批评后，普朗克在他的第二篇文章中，忽略了细节，认为它是"误解"的结果。然而，在第三篇文章中，尽管仍然追循他业已采取的路线，普朗克清楚地表明他已经意识到玻尔兹曼的批

评的相关性，因为在文章结束时，他作了下述评论：

> 或许这样的情形也有可能发生，即辐射过程起初是无序的，但随后看上去有序了。在这种情形中，辐射强度在开始时不变，但在随后的时间中将经历显著的变化。这种过程在自然中是否真实发生的可能性，有赖于初始条件的种类。

从他给科学院的第四篇通信开始，普朗克的纲领完全改变了；事实上，它开始于这样一个陈述："由于一个精确的初步假设，我们必须排除所有那些不表现出不可逆性特性的辐射过程。"无疑，这是一个进展过程中的转变，或可解释为他自己研究方式的转变，科学史家对此只能猜测，因为缺乏作者本人明确的承认。可以确定的是，远在1901年引入他的量子辐射假说之前，普朗克已经转向分子运动论思想，或者再次采用我们前面所用的术语，他已经使用了"玻尔兹曼式的"策略。

实际上，他在此篇文章中获得的成果(维恩分布，已知与实验数据有着合理的一致性)，仅仅依赖于一个与玻尔兹曼的 H 有着渊源上的相似(只有符号上的不同)的熵的特设性定义，以及追求它在限定条件下的最大值，如在第五篇文章中所承认的。

当时，普朗克感到他已达到了一个重要的成果，或至少某种看起来像是重要成果的东西。于是，他为《物理学杂志》准备了一篇论文，在其中长篇的导言中，他强调了他的新纲领与玻尔兹曼纲领之间的类似性："没有障碍会阻拦分子混沌假说全面发展的道路。在气体分子运动论的基础上，在各个方向上发展热力学第二定律的可能性也相应地得到保障。"然而，普朗克也完全清楚他的论证的薄弱之处。此外，实验数据也开始表明维恩能量分布定律并非如迄今为止所设想的那么准确。

普朗克真切地承认了玻尔兹曼对他的工作的批评，这一点可以从

他被授予诺贝尔奖的庆祝会上的致辞中看出来：

> 我提出谐振子能施加一种有时间取向的，因而是不可逆的活动于周围的场能量，但也因此取一种唯能论的立场而与玻尔兹曼对立。借助于他在此类问题上更成熟的经历，他无须多少时间就能指出，按照经典力学定律，所有我所考虑的现象都能在两个方向上发生，即为谐振子所发射的球面波能反过来回到同一谐振子，以一种球面波的方式逐渐收缩，直到完全被吸收。这样，谐振子能把它先前接收的能量重新发送到空间中，沿着它达到过的同一方向。确实，在我的辐射假说中，通过引入限制性条件，我能忽略像有时间取向的波这样独特的定义，但同样正确的是所有这些分析，显然都表现出缺乏一种本质的联系，以达到问题的解决。
>
> 在这些条件下，我只有一种选择，即再从相反的方向来研究这一问题，我的意思是从热力学的立场来着手于它，这是一种使我感到更轻松，或者说更自在的立场。

他因此写了一篇文章，其中出于简单性和与实验数据相符的动机，他提出了熵对于内能二次微分的公式，并运用业已确认的关系，通过积分，获得了如今为人们熟知的普朗克分布。

此时，就有可能来推导普朗克在以前的研究中充分运用过的谐振子的能量和熵的表示式。尤其是用能量来表示的熵的表示式适宜于为玻尔兹曼所引入、并在第六章中详细讨论过的那种组合解释。如普朗克自己所说："从这一立场来看问题，导致我再次采用玻尔兹曼的观点，来思考能量与熵之间的关系。几周之后，这是我生命中最为顽强艰难的时光，一道闪电照亮了我正在其中苦苦挣扎的黑夜。"

人们事实上必须把刚才提到的公式，转换为仅包含整数的形式。如我们在第六章中所见，玻尔兹曼已经把能量细分为一定数量的，比

方说 P 个“量子”，标记为 ε，从而为普朗克铺平了道路。让我们设确定频率的谐振子为 N，而每个谐振子的能量为 U，则 $NU = P\varepsilon$。但玻尔兹曼当时设想 ε 可以趋于零，而普朗克发现如果他想用组合分析来解释上面提到的熵的表示式，就不得不假设 ε 与振子的频率 ν 成正比，从而得出著名的公式 $\varepsilon = h\nu$。在与我们在第六章中所用的相反方向上使用斯特林公式，就可推导出如下的概率(普朗克标示为 R)：

$$R = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)!\ P!}$$

这个表示式的数值，等于 P 个不可区分的对象被分布于 P 个可区分的盒子中时的分布方式的数目。

这不过是他的论证中最有可能的重建方式，因为在作用量子 h 首次出现的参考文献中，普朗克引入了他通过回溯而得出的假说，然后再发展到组合计算，从而发现表示式 R。接着，他以“无疑非常冗长的”计算来寻求 P 的极大值，并简单地给出他计算的结果，而这一结果在前面提交科学院的文章中，已经在半经验的基础上引入了。

在他的发表于 1901 年的著名文章中，普朗克推演得更快。我们在那儿，可以看到对于玻尔兹曼概念的完全信奉：

> 熵说明了缺乏组织，而按照辐射的电磁理论，这种缺乏组织对于谐振子的单色振动来说——即使当后者位于稳态辐射场中——在于其振幅和位相连续变化的不规则性，当人们考虑一个对于振子的时间来说非常大，而对于测量来说非常短的时间间隔时。如果振幅和位相是绝对不变的，即如果振动是绝对均匀的，就不会有任何熵，振动能也就能完全转化为功。以一种稳态方式振动的单个振子的能量 U 于是应当被考虑为仅仅是时间平均，或者被考虑为(被证明为是相等的)某一时间瞬间的大数量 N 个同样谐振子的能量平均，这些谐振子处于稳态辐射场中，彼

此相距足够的远，以避免相互作用。正是在此意义上，我们来谈论谐振子的平均能量 U。

普朗克于是采用了熵与概率对数之间的关系，认为它的简单性“和与气体分子运动论的严格联系使得它具有着先验的辩护理由。”为了发现概率的表式，“必需考虑 $UN[=NU]$ 不是一个可无限细分的连续量，而是一个由相等的、分立的和有限的部分组成的量。让我们称这样的一个部分为能量元，其方式为

$$U_N = P\varepsilon,$$

其中 P 为一个很大的整数。”

他然后对 N 个具有能量 $P\varepsilon$ 的谐振子引入了前面文章中的组合计算，限定于热力学平衡条件下和使用已经在热力学基础上得到证明的维恩的一般定律(见第九章)；这蕴含着一个推论，即关系式 $\varepsilon = h\nu$。这样，如果人们应用著名的热力学关系，即熵对于能量的偏微分等于温度的倒数，立即就能再次得出普朗克在他前面的论文中已指出的奇异的分布定律。这里，人们以一种多少还有点含糊的方式，首次发现了谐振子是不可区分的这一假设，只有到了许多年以后(1924 年)，这一假设才清楚地被萨蒂恩德拉·纳特·玻色(1894～1974)作为一个假设，从而诞生了玻色－爱因斯坦统计。

普朗克的这一理论明显地得到玻尔兹曼的赞许，如在他的诺贝尔获奖演讲中再次表现出来的：“在如此多的幻灭之后，我感到特别满足的，是在收到我送给他的论文之后的来信中，玻尔兹曼宣布他完全赞同我，无论是在原理上，还是在我的推理环节上。”

回到爱因斯坦

我们今天看起来会感到吃惊的是这么一个事实，直到 1905 年，

普朗克的理论没受到什么关注，而且即便有所关注，也没有人认识到它包含着一种与经典理论明确对立的假设。还是爱因斯坦，继1905年的著名论文之后，他1906年撰文首次指出：

> 因此，我们必须认识到，普朗克辐射理论是以下述命题作为基本假设的：基元谐振子的能量只能够取$(R/N)\beta\nu$的整数倍这样的值[这里，按爱因斯坦的记号，$(R/N)\beta = h$]；一个谐振子通过吸收和发射，其能量跳跃式地改变，并且正好是$(R/N)\beta\nu$的整数倍。

当爱因斯坦写下这些语句时，他可能是统计力学中最为专业的科学家。如我们已注意到的，他确实读过玻尔兹曼的气体理论讲稿，独立地重新发现了吉布斯统计系综理论，是一位热力学涨落的专家，并曾应用相应的概念于布朗运动。如所周知，在他1905年的第一篇论文中，他引入了光量子概念，只是到1926年之后才称为光子，并说明了神秘的光电效应。光量子的概念在量子力学的发展中起着基础性的作用，但实际上在1922年之前，它却为人们所忽视，甚至明显地为大多数物理学家(包括尼耳斯·玻尔)所否认。当关于康普顿效应(发表于1923年)的消息开始传播开来后，我们如今称作光子的粒子概念才开始被接受。广为人知的事实是，爱因斯坦获得诺贝尔奖不是因为狭义相对论和广义相对论，而是如正式的推荐书中所说，“因为他在理论物理学中的成就，尤其是因为光电效应定律的发现。”

在随后的一篇论文中，爱因斯坦以一种甚至更为明确的方法，证明了普朗克理论，这是当时可得到的惟一与实验数据相符的论文，并要求与传统概念决裂。

1907年，爱因斯坦证明能量量子假说也可应用于比热理论，第一次指出量子概念可应用于不涉及电磁辐射的问题之中。回想起我们在第四章中曾提到过，玻尔兹曼首先计算了固体的比热，并发现了

与皮埃尔·路易斯·杜隆(1785～1838)和亚利克西斯·特里西·珀替(1791～1820)于1819年发现的经验规律完全一致的数值。他们的规则在确定原子量中起着重要的作用，但很快就清楚了，这一规则并非总是精确的。特别是1833年，A.阿伏伽德罗注意到它对于碳不成立。随后更精确的测量表明，杜隆-珀替的偏差甚至比阿伏伽德罗所指出的还要严重。此外，数据自身之间也不一致。海因里希·弗里德利希·韦伯(1843～1912)当时在柏林，但后来前往苏黎世，并在那儿成为爱因斯坦的老师，他注意到实验是在不同温度下进行的，如果碳的比热会随着温度而变化，实验结果就可以彼此符合。他通过实验确证了这一猜想，尽管他在晴好的天气必须中断他的实验，因为没有雪来用于他的冰量热器。詹姆斯·迪尤尔(1842～1923)也与韦伯同一年作出了同样的猜测，并在许多年后(1905年)测量了碳的比热在20至85 K范围内的极低的平均值。

312 让我们回到玻尔兹曼。他证明了杜隆－珀替定律是他的能量均分定理的推论，并说他的理论成果“对除了碳、硼和硅之外的所有简单固体”，都能与实验很好地相符。他也曾推测这些偏差是由于相邻点阵点上的原子在低温时“粘在一起”，从而失去自由度的结果。在第八章中我们看到，显然对于多原子气体的比热存在着问题。

爱因斯坦的工作是引人注目的，因为这是首次把量子统计概念应用于不同于热辐射的问题。在论及关于振子平均能量的普朗克公式时，爱因斯坦设问：我们是否必须修改不同于辐射的周期性振动结构的理论？他的回答是：

> 根据我的意见，答案是没有疑问的。如果普朗克辐射理论接触到了事物的核心，那么我们必须期望在其他热学理论领域中也可以发现现代[1907年]分子运动论和经验之间的矛盾。这些矛盾可以用这里所采取的新方法来消除。在我看来，这一期望实际上是实现了。

于是，他引入了一个固体的框架模型，其中所有点阵原子以单一频率 ν 在其平衡位置附近振动。导出的比热公式中含有一个临界温度 $T_E = h\nu/k$。通过与实验数据相比较，发现对于碳来说，T_E 约为 1 300 K，与之对比，铅的数值约为 70 K。这说明了为什么在室温下碳表现为一种奇异的方式：这比起它的临界温度实在是太低了！

更为精确的测量，包括爱因斯坦所不知道的迪尤尔的测量，以及能斯特于 1911 年所进行的实验，表明爱因斯坦的公式并不那么好。沿着爱因斯坦的思想路线，彼得·德拜(1884～1966)于 1912 年，马克斯·玻恩(1882～1970)和特奥多尔·冯·卡尔曼(1881～1963)于 1912～1913 年间得出了更好的理论。

剩下来的故事，即普朗克的第二个理论和索末菲的论文如何铺平了玻尔-索末菲理论的道路，已经超出了本书的范围，也多少为人们所知(例如见 [18] 或 [43])。玻尔兹曼的思想经适当的修改，也导致了玻色－爱因斯坦统计和费米－狄拉克统计，它们几乎是与波动力学或量子力学同时出现的。

现在，让我们短暂地返回爱因斯坦的布朗运动理论。他发现粒子在时间间隔 τ 中的平均速度将反比于 τ 的平方根。换言之，即时速度是没有意义的，或随机的(由于爱因斯坦模型的理想化，如他在随后的一篇论文中所评论的)。因此，以前的实验家试图测量的，是并非完全确定的东西。这是已为人们了解了近 50 年的扩散方程的数学。随着一个简单的论证而来的，也有在密度为 ρ_0 的液体中，密度为 ρ 的粒子纵向距离的分布公式。这是佩林用以获得阿伏伽德罗常数的公式，并因此提供了爱因斯坦理论及分子运动存在的惊人确证。

为什么爱因斯坦之前的人们失去了发现他的理论的机遇呢？这是因为他们理解涨落的作用。他们认为持续相继的随机脉冲——其中每个都给粒子以微小速度——的效应将会抵消，但情形并非如此。这些脉冲产生随机的移动，这种移动通过微小的随机步骤，趋于带着

布朗粒子远离它的起始点。随机性反映在这一事实中，即粒子运行的距离对于足够长的时间来说，不是比例于时间，而是比例于它的平方根。这当然是一个为均分所支配的相当高的最大速度。

对于布朗运动的说明是分子运动论的伟大成功，它说服了像奥斯特瓦耳德这样的人，如我们在前面的章节中所看到的。

玻尔兹曼的思想在20世纪所起的作用

要全面评价玻尔兹曼的思想在20世纪中的成功，当然是不可能的。我们将局限于对与他的方程相关的概念和问题的发展作一个简短的回顾。

引人注目的是：即使是引入了现代物理学的理论之后，玻尔兹曼方程继续在几个领域中起着基础的作用，而不仅仅是在气体中；在研究稀薄气体的性质中，它已经成为一种实用的工具。

1912年，伟大的数学家大卫·希尔伯特(1862～1943)指出了如何以反比于气体密度的参量的幂级数展开的形式，获得玻尔兹曼方程的近似解。他的论文也重印为他的题为《线性积分的基础理论》的论著的第二十二章。这么做的动机在此书的前言中清楚地作出了说明(“最后，我近来加了关于气体分子运动论的新的一章。……我认识到了气体理论中，涉及到积分方程的最为壮观的定理应用。”)

后来，约在同一年(1916～1917年)，悉尼·查普曼(1888～1970)和戴维·恩斯考格(1884～1947)各自独立地获得了对于玻尔兹曼方程的近似解，这种解对稀薄气体成立。他们的结果在实际目的上是一致的，但他们的方法却在精神上和细节上都有着很大的差异。恩斯考格引入了一种系统技巧，以使希耳伯特的思想一般化，而查普曼则简单地拓展了以前为麦克斯韦所使用的方法，去获取输运系数。以后，查普曼和T.G.考林在他们题为《非均匀气体的数学方法》的书中采用了恩斯考格的方法，这一方法由此以查普曼-恩斯考格方法而著称。

其后许多年间，在解玻尔兹曼方程上没有什么根本上的进展。然而，分子运动论的思想已渗透到其他领域，例如辐射转移，离子化气体和随后的中子输运理论。如我们在前面章节中所提到的，洛伦兹已经思考过离子化气体的特殊情形：金属中的电子；他的理论以后也被拓展去说明空穴，即正电荷的携带者，并且应用于半导体。

如我们在第五章中所暗示的，玻尔兹曼方程今天已成为数学严格理论中详细研究的对象。我们在第五章中提到过，这一发展始于1933年塔格·吉利斯·托尔斯滕·卡尔曼(1892～1949)的论文，他由所谓的空间均匀情形中的硬球气体，证明了全域存在和惟一性定理(即他证明当分布函数不依赖于位置 x，而仅依赖于速度 ξ 和时间 t 时，如果我们指定 $t=0$ 时的分布，在随后的时间中，有且仅有一种分布与 $t=0$ 时给定的分布相符)。这一定理的证明起初有一限制性假设，即初始数据仅通过其数值而依赖于分子速度。这一限制在一本于同一作者身后出版、由 L. 卡尔森(他在关键的时刻完成了它)和 O. 弗罗斯特曼编辑的书中被取消了。

1949年，哈诺耳德·格拉德(1923～1986)发表了一篇很快就名闻遐迩的论文，因为其中包含了通过拓展解为一系列正交多项式，以求解玻尔兹曼方程的系统方法。然而，如我们在第五章中指出的，格拉德所作出的更为根本性的贡献，在于通过以一种精确的方式，引入了极限概念，这一极限如今被称作玻尔兹曼-格拉德极限。

20世纪50年代中，又出现了一些重要的成果，如美国的特鲁斯德尔和前苏联的 V.S. 加耳金独立发现的精确解，而 D. 莫根施特恩则扩展了存在理论，证明了空间均匀情形中麦克斯韦分子气体全域存在定理，而 L. 阿尔克伊德于1972年又扩充了他的工作。用于获取最新成果的技巧已变得相当复杂，即使是作一个综合描述也是如此。关于这一主题，除了第五章中给出的简略线索外，我们提请感兴趣的读者关注专门论述。然而，我们还是忍不住要提到皮埃尔-路易斯·莱昂于1994年获得的费尔兹奖(所谓的“数学家的诺贝尔奖”)。推

荐书中明确地引证了他与已故的罗纳德·迪普纳关于玻尔兹曼方程的解存在的工作。

玻尔兹曼方程不仅是一种概念工具，也是一个实用的工作。当航天工程师研究航天器的重新返回时，他必须考虑到这样的事实，把空气描述为一种连续体的做法通常适用于飞机设计，但对大气层的上部不再成立，他必须运用玻尔兹曼方程。如果我们想研究污染我们大气的微小粒子，由于这些粒子大小的减小，我们再一次必须放弃作为连续体的空气模型，而采用玻尔兹曼方程。

工程师们对玻尔兹曼方程作适当修改之后，用于研究其他现代技术领域中的重要现象，从核裂变反应堆中中子的运动，到聚变反应堆研究中载荷粒子的运动，从燃烧室中的辐射，到载荷子在非常小的半导体芯片中的运动。

玻尔兹曼会为这些技术应用而高兴，他总是对于技术很感兴趣（尤其是他预言了飞机对于飞艇的优越性），并且不止一次地赞扬技术在科学发展中所起的作用，正如人们从下述两段引文中可以看出的：

> 无论科学如何为自身目标的理想特性而骄傲，不无轻蔑地看待技术和实践，不可否认它的兴起正是为了满足纯实际的需要。此外，当前自然科学的胜利进军如果没有技术专家作为先锋，也不可能造就如此无与伦比的辉煌。[1902 年 10 月]

> 这就是为什么我不是把技术成就看作是自然科学的无足轻重的副产品，而看作其逻辑证明的缘由。不取得这些实际成就，我们就不懂得如何推理。唯有这些推理的正确，才会导致实践的成功。[1905 年 1 月]

尽管事实上玻尔兹曼的思想依然繁荣，并继续被用于对许多现象的更好的理解，我们还是必须认识到，基本物理的主流毕竟已经远离他的观点。其部分原因，正是由于玻尔兹曼的贡献的本质：事实上

他的基本成果具有永久性的价值，因为是他第一个给了我们以工具，去协调非常不同于我们的日常经验的微观物理学与作为这种经验基础的宏观物理学的关系。但我们也必须承认，他的模型与为现代物理学家们所使用的模型相比，仅仅是一个初步的、粗糙的近似。如今的原子，已经表现出其内部构成的丰富的复杂性，基本粒子似乎已组成一个有着令人难以置信的多样性的动物园。原子并非简单的对象这一事实，如我们所见，对于玻尔兹曼本人而言是不争的事实；光谱学和化学的发现也表明，原子不可能是简单的、不可分的实体。但我们今天已经知道，仅寻求更小的实体是不够的。法拉第的伟大思想，即实在的真实方面在于场概念，已经历了未曾预料的进展；在麦克斯韦方程的巨大成功之后，广义相对论又为这一至今依然模糊的图像增添了浓墨重彩的一笔。场变成了空间本身，空间也不再是先验确定的容器，而是一种以惊人方式变化的动力学实体。量子理论也业已发展成了量子场论，物理学家们用服从奇异的(非经典的)规则的场来进行着演算，尽管他们还不时谈论着基本粒子。量子力学的哥本哈根诠释直到30年前还是全体理论物理学家的信条，现在却使他们感受到了不舒服，新的诠释依然在寻求之中。或许，我们这里所作的玻尔兹曼哲学思想的研究，会有助于去发现对于现代物理学所呈现于我们面前的复杂图像的更好的理解。或许，我们正接近于我们观念的又一次伟大的变革，早在库恩之前很久，玻尔兹曼就已指出：这种变革是科学进步的必要组成部分。

后　　记

在这本关于科学史上最为悲剧性的人物之一的生平和工作的书临近结束之际，作者想就导致玻尔兹曼自杀的缘由再多说两句。我们在第一章中，已经以相当长的篇幅说起过他自 1888 年起就患有的狂郁征候群。但这是否足以说明他不顾一切的绝望行动呢？并且如果情况的确如此，为什么会发生于这一时间，这一地点呢？我们或许永远无法知道，尽管我们在第一章中提供了许多细节。这里，我们只想引用他的外孙 D. 弗拉姆的评论：

> 玻尔兹曼生命的悲剧，在于他未能经历自己思想的光荣的胜利。他在决定性的战役仍在进行时就离开了这个世界。在邻近的里雅斯特的杜伊诺的休假期间，我的母亲艾尔莎·玻尔兹曼——她被她父亲视为自己生命中的阳光，发现她的父亲上吊自杀了。她当时年仅 14 岁。

如果这是一本小说，或是悲剧的剧本，作者可以去想象，当读到爱因斯坦关于质量和能量之间等价的论文时，玻尔兹曼会认为他毕生所从事的证明原子存在的努力失败了。唯能论的信条之一不就是一切都是能量吗？玻尔兹曼不是坚持认为，如我们在第十一章中所见，唯能论不能用能量来说明质量吗？或许悲剧剧本的作者还会设想，玻尔兹曼刚刚上吊，就有一个演员走上舞台，拿来爱因斯坦的前一篇关于布朗运动的论文，以表明原子的存在已经为实验所证明。

但本书不是艺术品，它致力于描述那些可靠的事实。我们可以猜测，但我们不能把猜测用作已经证实的事实。因此，我们只能让玻尔兹曼生命中告别行为的一幕依然掩藏在神秘的帷幕之后。

年　表

1790 年：J. 赫勒帕斯出生。

1791 年：M. 法拉第出生。

1796 年：N. L. S. 卡诺出生。

1803 年：C. 多普勒出生。

1804 年：W. 韦伯出生。

1805 年：F. 席勒去世。

1811 年：R. W. 冯 · 本生出生。

1814 年：J. R. 迈尔出生。

1818 年：J. P. 焦耳出生。

1821 年：J. 洛喜密脱和 H. L. F. 冯 · 亥姆霍茨出生。

1822 年：R. 克劳修斯，K. 克罗尼希和 J. 汤姆孙出生。

1824 年：G. 基尔霍夫和 W. 汤姆孙(拉格斯的开尔文勋爵)出生。

1831 年：J. C. 麦克斯韦出生。

1832 年：N. L. S. 卡诺去世。

1835 年：J. 斯忒藩和 A. 拜尔出生。

1837 年：L. 克尼格斯伯格和 J. D. 范德瓦尔斯出生。

1838 年：E. 马赫和 F. 布伦塔诺出生。

1839 年：J. W. 吉布斯出生。

1842 年：J. W. 斯特拉特(瑞利勋爵)，L. 泽恩克和 C. 冯 · 林德出生。

1844 年：L. E. 玻尔兹曼出生。

1849 年：H. 泽利格和 F. 克莱因出生。

1850 年：阿耳伯特 · 冯 · 埃廷斯豪森和 A. 普林斯海姆出生。

1852 年：W. 汤姆孙(开尔文勋爵)宣称机械能的耗散趋向。

1854 年：H. 冯 · 亥姆霍茨描述宇宙的“热寂”。

1853 年：H. A. 洛伦兹和 W. 奥斯特瓦耳德出生。

1854 年：C. 多普勒去世。

1856 年：W. F. A. 冯 · 迪克和 S. 弗洛伊德出生。

1857 年：H. 赫兹出生。

1858 年：克劳修斯引入平均自由程概念。 M. 普朗克出生。

1859 年：S. A. 阿伦尼乌斯出生。 G. 基尔霍夫引入物体对于辐射的发射和吸收能力概念。

1860 年：J. C. 麦克斯韦引入以他的名字命名的平衡态分布。

1861 年：P.-M. 迪昂出生。

1862 年：D. 希耳伯特出生。

1864 年：W. 能斯特出生。

1865 年：克劳修斯引入熵的概念。

1867 年：玻尔兹曼成为助理教授。 麦克斯韦引入转移方程。 M. 法拉第去世。

1868 年：玻尔兹曼把麦克斯韦分布扩展到保守力场作用下处于平衡的分子，并被授予圣徒仁慈奖。 A. 索末菲出生。

1869 年：玻尔兹曼获得格拉茨大学数学物理学教授职位。J. 赫拉帕斯去世。

1871 年：玻尔兹曼第一次尝试在力学基础上理解热力学第二定律。J. W. 吉布斯被任命为耶鲁大学数学物理学教授。

1872 年：玻尔兹曼发表用他的名字命名的方程。

1873 年：玻尔兹曼发表关于电介质电容率与折射率之间关系的研究，接受维也纳大学数学教授的讲席。

1874 年：W. 汤姆孙（开尔文勋爵）首先讨论了可逆性佯谬。F. 哈泽内尔，G. 马尔科尼和 A. 舍恩贝格出生。

1876 年：玻尔兹曼与亨丽埃特 · 冯 · 艾根特勒结婚，并回到格拉茨大学。J. 洛喜密脱发表他的关于可逆性佯谬的文章。

1877 年：玻尔兹曼发表讨论与可逆性佯谬相关的反对意见的文章，及另一篇包含了现在以他的名字命名的熵与概率之间关系的文章。

1878 年：玻尔兹曼成为格拉茨大学教务长。J. R. 迈尔去世。L. 迈特纳出生。

1879 年：J. C. 麦克斯韦和 K. 克勒尼希去世。A. 爱因斯坦出生。

1880 年：R. 穆西尔出生。

1881 年：玻尔兹曼成为政府顾问。G. 黑尔姆出生。

1882 年：M. 玻恩出生。

1884 年：玻尔兹曼发表他对于斯忒藩-玻尔兹曼定律的理论推导，同时也是他引入（以不同的名字）微观正则系综和正则系综的基础性论文。D. 恩斯考格出生。

1885 年：玻尔兹曼的母亲去世。玻尔兹曼成为皇家科学院院士。

1887 年：H. A. 洛伦兹发表玻尔兹曼推导多原子分子的 H 定理中一处缺陷。G. 基尔霍夫去世。玻尔兹曼成为格拉兹

大学校长。

1888 年：玻尔兹曼先是接受，然后又拒绝了柏林大学的职位，第一次表现出狂郁症的迹象。 P. 埃伦菲斯特出生。

R. 克劳修斯去世。

1889 年：玻尔兹曼成为宫廷顾问。 他的儿子路德维希去世。

L. 维特根斯坦出生。 J. P. 焦耳去世。

1890 年：玻尔兹曼被任命为慕尼黑大学理论物理学教授。

1891 年：W. 韦伯去世。

1892 年：J. 汤姆孙去世。 H. A. 洛伦兹开始发表关于电动力学的论文。

1893 年：H. 彭加勒提出复现佯谬作为反对分子运动论的论据。

J. 斯忒藩去世。

1894 年：H. L. F. 冯 · 亥姆霍茨和 H. 赫兹去世。 玻尔兹曼成为牛津大学名誉博士。

1895 年：J. 洛喜密脱去世。 玻尔兹曼与奥斯特瓦耳德之间在吕贝克就唯能论公开辩论。

1896 年：E. 策梅罗发表讨论复现佯谬的论文。 普朗克关于电磁辐射的热力学的第一篇论文。

1897 年：玻尔兹曼回答策梅罗的文章，并批评了普朗克研究辐射热力学的方法。

1898 年：普朗克承认玻尔兹曼的批评，并改变了他的辐射热的热力学方法。

1899 年：R. W. 冯 · 本生去世。 玻尔兹曼进行第一次美国之旅，并获得克拉克大学名誉博士学位。

1900 年：玻尔兹曼接受莱比锡大学理论物理学教授的聘任。 普朗克引入辐射量子假说。

1901 年：马赫退休。 玻尔兹曼巡游地中海。

1902 年：玻尔兹曼回到维也纳。 J. W. 吉布斯发表关于统计力学

的著作。卡尔·波普尔出生。

1903年：J.W.吉布斯去世。玻尔兹曼开始讲授曾经由马赫主讲的科学哲学课程。

1904年：玻尔兹曼出席圣路易斯会议。

1905年：玻尔兹曼的最后一次美国之行(伯克利)。A.爱因斯坦发表关于相对论、量子论和布朗运动的三篇论文。

1906年：玻尔兹曼自杀。爱因斯坦首先意识到普朗克黑体辐射理论包含着与经典物理相矛盾的假设。

1907年：W.汤姆孙(拉格斯的开尔文勋爵)去世。爱因斯坦证明量子假说也可应用于比热理论。

1915年：哈泽内尔去世。

1916年：E.马赫和P.-M.迪昂去世。

1917年：阿道夫·拜尔和F.布伦塔诺去世。

1919年：J.W.斯特拉特(瑞利勋爵)去世。

1921年：恩斯考格对稠密气体引入玻尔兹曼方程的近似拓展。L.柯尼希斯贝格尔去世。

1922年：托马斯·库恩出生。

1923年：J.D.范德瓦尔斯和G.F.黑尔姆去世。

1924年：H.泽利格去世。

1925年：克莱因去世。

1927年：S.A.阿伦尼乌斯去世。

1928年：H.A.洛伦兹去世。

1932年：阿耳伯特·冯·埃廷斯豪森和W.奥斯特瓦耳德去世。

1933年：埃伦菲斯特去世。

1934年：W.F.A.冯·迪克和C.冯·林德去世。

1936年：卡尔·克劳斯去世。

1937年：L.泽恩克和G.马尔科尼去世。

1938年：亨丽埃特·冯·艾根特勒去世。

1939 年：S. 弗洛伊德去世。

1941 年：A. 普林斯海姆和 W. 能斯脱去世。

1942 年：R. 穆西尔去世。

1943 年：D. 希耳伯特去世。

1945 年：M. 普朗克去世。

1947 年：D. 恩斯考格去世。

1951 年：A. 索末菲，A. 舍恩贝格和 L. 维特根斯坦去世。

1955 年：A. 爱因斯坦去世。

1968 年：L. 迈特纳去世。

1970 年：M. 玻恩去世。

1994 年：卡尔 · 波普尔去世。

1996 年：托马斯 · 库恩去世。

一个德国教授的黄金国之旅*

路德维希·玻尔兹曼

由于我已数次访问过美国，同样也数次访问过君士坦丁堡、雅典、士麦那和阿尔及尔，因而多次被要求发表一些游记。一切其他的事情似乎都过于琐碎，不值得一记，只有最近前往加利福尼亚的旅行，倒是确有一些优美之处，因此，我就尝试着以一种轻松的笔调把它描述出来。

我并不是想说人们必须去加利福尼亚，去看一看那些有趣的优美的事物，从中得到享受。在我们祖国的激动人心的山区旅游，同样有可能感受到人们都会感觉到的愉悦和快乐。人们可以面对简朴的膳食，就像国王一样快乐，而在加利福尼亚，你面对的则是长尾织布鸟和牡蛎。

---

* 由玛格丽特·马耳特译自L.玻尔兹曼的《通俗文集》，巴尔特，莱比锡，1905年，经许可重印，取自《核能杂志》1977年第147～159页，英国牛津埃耳瑟维尔科学有限公司（标题中“黄金国”一词指美国加州——译注）。

我的旅程的第一部分非常匆忙，我的描述也就匆匆而过。6月8号，我像往常一样，出席维也纳科学院的周四会议。当我们离开时，一位同僚注意到我并未像预期的那样转向贝克大街，而是走向斯图本林，于是他问我准备去哪儿。“去旧金山。”我的回答相当简捷。

在西北火车站，我悠闲地享用了一顿很嫩的烤猪肉、卷心菜和土豆，并且喝了几杯啤酒。我对数字的记忆在别的方面还差强人意，但若论起啤酒的杯数来，几乎总会出错。

经常出门旅行的人决不会对我谈论饮食而感到惊奇。这不仅是一个重要的因素，而且正是问题的关键。在旅行中，会遭遇大量未曾经历过的影响，保持身体的健康是必不可少的，而首先是保持好胃口，尤其是讲究的维也纳人的胃口。维也纳人在吃着他最后的“红烧肉加面疙瘩”时，决不会无动于衷，瑞士人在他们对于“牧人歌舞”和牧铃声的留恋中表达思乡之情，而维也纳人想的则是“腌熏肉加丸子”。“不要说，年龄使我变得幼稚，在我身上，确实有一些真正孩童般的东西。”

当我进餐完毕，我夫人和孩子们带着我的行李也出现了。在与她们告别之后，我踏上了行程，首先前往莱比锡出席科学院联席会议，会议将于第二天上午10点开幕。在火车上，我尽可能地使自己显得体面、高雅(在美国的火车上，我可以借助于“盥洗室”来这么做)，而一到莱比锡，我立刻转乘一辆出租车，准时赶上第一次会议。

在大礼堂的门口，遇上了我的同事克雷德纳，他也是来出席这次会议的。承蒙他的好意，帮我把行李搬到了大堂，因为，我正为没有地方寄存这些东西而束手无策呢。

我是以一种不无焦虑的心情前来出席此次联席会议的：会上要讨论的一个议题是令我大伤脑筋的。

如果我引导读者来看一看科学活动的场所，介绍一下它的外部结构，并说明其机制，读者是否会感到厌烦？我希望不会。现如今几乎每个受过教育的人，在他的旅游手册的引导下，都参观过一些制造

家用器具的工厂。而我发现，对于玻璃器皿或金属器具终于形成人们熟识模样的好奇心的满足，既是知识性的，也是娱乐性的。那么为什么我不能假设，对于这么一种(科学)工厂的机制，其对于文化的重要性远胜过最大的玻璃工厂，难道人们会缺乏好奇心？即使这个工厂并没有更多热空气。

几个德语国家的科学院和著名学会联合起来，举办每年一次的大会，讨论具有普遍重要性的问题，这是一种“学术卡特尔”。几年前，大会决定提供物质支持，以出版一本巨著《数学科学百科全书》。数学在上一世纪其范围已得到极大扩展；此外，每位作者都使用自己特殊的语汇，写出的文章极为含糊，只有与他相处密切的同事才能看懂，而即便如此也非常困难。而在这复杂费解的数学文献中，埋藏着丰富的、有益的、甚至是不可或缺的材料，有待于实际应用。

所议的百科全书的任务，是以一种有序的和易于理解的形式，收集和呈现所有这种材料。它将使数学中所取得的成就易于为数学家们接近，并同时在理论家和实验家之间架起沟通的桥梁。出版这么一部数学百科全书的需求是如此地显而易见，以至于格丁根的克莱因教授把它描述为数学的公共设施。

如果说仅仅引用那些最显著的成就，而无需过多的批评，并登记下最重要、最著名的进展，这项任务就不至于如此困难。要从含糊的文献中提取真正有用的东西，剔除那些不重要的内容，同时尽可能全面地覆盖所有文献，并把所有信息以一种清晰简单的方式排列以利于读者阅读，这些对于任何研究数学文献的人来说，都是令人恐怖的任务。然而，前面说到的克莱因教授却为这些问题所吸引。科学院提供了用于印刷成本、作者稿费和交通费用的钱，克莱因和他的团队则正在从事这项工作。

第一步是寻找每一专业领域里的世界级的专家。的确，德国、法国、俄国和日本正在一起和谐地工作。所选择的专家通常都是著名的人物：他经费充足，时间却很紧，或许对此项工作的兴趣并不

大，却也还没有固执到那个份儿上；他首先必须被诱使应允下来写稿，接着就被各种写稿须知和规则所淹没，以保证其写作与整体框架合拍，而“最后的但并非最不重要的”，就是要遵守承诺，按期完稿。

许许多多的时间被用来考虑：是否马上就把某一篇文章包括进来，因为它已经寄来了，尽管它最好放在全书的后面，而那些应放在前面的，却至今杳无音讯。无限制的经费被用于把克莱因和他的使徒们送到地球的各个角落，从而使撰稿人无需分担前来会谈的压力。有一个空缺保持了很长时间，这是因为被选来填补它的人是一位俄国的官员，如今被关押在阿瑟港。我经常出席这些关于百科全书的会议，德国的戏剧家们从会上的紧张和兴奋中，肯定能获益匪浅。

还是回头来说说我自己。当克莱因提议我为百科全书写篇文章时，我在很长时间内都拒他于门外。最后，他写信给我说：“如果你不写，那我只好让策梅罗来写了。”此人所持的观点与我正相反，为使策梅罗的理论不成为百科全书上的流行的理论，我只能回信说：“佩塔卢茨对婚姻所做的事，就是我做的事。”（所有引号中的引文大多数取自席勒著作，以作为对于其百年寿辰追加的庆贺。语出何处，读者可自己去查！）

现在，到了我该交稿的时候了。在这个国家中，我倒更情愿在9月份休息一下，以恢复旅途的劳顿，但我已经答应了这事，因而只好与一小队维也纳物理学家一起，整日在数学文献堆中搜寻，准备这篇文章。“誓言的永恒性”。

维尔廷格教授看来也与我同病相怜，因为他正在把百科全书的徽标画得像是一个捕鼠器：为诱饵所吸引着，教授们纷纷被擒。

那么，这整个工作的吸引力到底在哪儿呢？这儿并没有什么特殊的荣誉，除了知晓做了一些有用的事以外；这儿也挣不了什么钱。克莱因是如何找到他所盯上的每个人的弱点的呢？他是如何用一种心理上的洞察力，发现了克服每一个体的不情愿的关键的呢？即使是哲学家们，也会为他的这种洞察力而嫉妒不已。这一切都来自他

的理想主义，正是这种理想主义，给了他以这种技巧；而如果我们睁大双眼，我们会在各处，直到远至大洋彼岸，发现这种理想主义。那儿有着两座坚实的白塔，利克天文台在欢迎着我们，这是一位理想主义者和数百万巨富的杰作，而其中更令人瞩目的是后者。长期以来，我一直在深思这一如今更为引人注目的现象：在美国，百万富翁们是理想主义者，或者说理想主义者会成为百万富翁！而熏肉和苹果布丁应受到高度的尊重；各地的理想主义者都需要良好的消化力。

克莱因与他的合作者们的理想主义结出了丰硕的果实。就在第一部分问世后，印刷频率正在加快；法语版已经开始，英文版也很快随之而至。科学院已把它归入成功，而销售商也一片繁荣。

不幸的是柏林科学院不属于这一卡特尔，也没参加这一合作。在绍斯波特的气象学家大会和在圣路易斯的太阳研究大会上，他们都没有代表参加。我怕这种他们还不起动的不参与原理，会使他们自身和德国遭受比科学更多的损害。令我烦恼的是在绍斯波特和圣路易斯，法文已经在“外国人”（非英语使用者）中占了优先地位。我们德语国家确实不应去排在第二位！但我一个奥地利人能做些什么？只要哈恩能出席气象学大会，他却令人痛心地缺席了。但就不能劝说他出席吗？！

既然我是在写旅游见闻，我就应当给我的舌头以自由，信马由缰。这里，我不应删节一位美国同行所谈到的柏林的衰落。有这么一个事实，在魏尔斯特拉斯、克罗内克、库默尔、亥姆霍茨和基尔霍夫时代，美国的数学家和物理学家大多数都去柏林学习，而现在，他们更愿意去剑桥，或是去巴黎学习。由于更加了解德国人的人们愈来愈少，美国，因而整个世界都正在倒退。这一位同行还坚持认为，如果我没有拒绝柏林大学的职位，情形就会大有改善。的确，我的讲课的作用有限，但在讨论任命事项和新的职位的设立时，一个人就能有着巨大的分量，如果他与克莱因的理想主义和克莱因的信念联手起来的话。许多未能获得职位的人，只要他们能以正确的方式

去着手，就可以获得；一个其貌不扬的车轮，如果总是在正确的位置正确地发挥着作用，就能获取很大功效。

如果在这漫长的旅途中，我在每一个莱比锡那么大小的城镇都停一下，我就不可能走出太远；但是，人们无须去依据人数来算计，而应去掂量其分量，当然，这里的分量，指的是他们在思想上的意义。

在几次非常愉快的私人聚餐和一次官方宴请——其中我第一次个人会晤了萨克森的教育部长赛德维茨，我曾在其手下当过两年教授——之后，我来到了不来梅，然后与霍亨索伦王子一起去纽约。这不是说我有这份荣耀陪同这位王子同船去美国，而不过是说他把我背负其上。从这港口出发的是皇太子威廉号，而往回返程的是威廉二世号。

亲爱的读者，尽管我行色匆匆，但却无法在谈笑间打发掉从不来梅到纽约的海上航程。巨大的远洋蒸汽船是人类最值得赞美的发明之一，它们的每一次航行似乎都要比上一次更加愉快。奇妙的大海波涛翻滚，每一天都面貌一新，每一天都更加迷人！今天，它白沫飞溅，异常喧腾。看！远方的那条船，此刻，它被波浪吞没了！但不！船身又从水中钻了出来，满载着胜利的豪情。到明天，天气会再次平和，海面风平浪静，却笼罩着朦胧的灰色；天空也是灰蒙蒙的，正如忧郁者的绘画风格。接着，太阳冲破迷雾，闪着黄红色的光在云层笼罩的浩瀚的阴影中跳跃，金色的光线与灰暗融合在一起。随之而来的是整个天空再现蔚蓝——大海上泛起蔚蓝和银白色的粼粼波光，闪耀得我不得不闭上眼睛。只有在特殊的日子里，大海才会穿上它最美丽的深蓝色的礼服，一种如此深沉，却又如此辉煌的色调，边上的奶白色泡沫就像是它的饰带。有一次，我读到一位艺术家花了许多个日夜来寻找一种特殊的颜色时，觉得好笑；现在，我再也笑不出来了：面对着海洋的这种色彩，我的眼眶里竟然渗出了泪水。何以仅仅一种颜色就让人泪水盈眶？接着，让我们再来想象一下漆黑的夜晚里，月光或磷光的醉人效果！真的，必须成为一个艺术家，才

能转达出所有这种种的惊叹，甚至即便如此，也是无法办到的。

如果说有什么比这种自然的美更值得赞美的话，那就是人类的技艺——在这场早在腓尼基时代以前早就开始的与浩瀚无边的大海的搏斗中，人类赢得了胜利。划开水面的船的龙骨是何等的无情，而搅拌着的螺旋桨周围翻腾起的海神的泡沫又是何等的汹涌！的确，自然界中最伟大的奇迹，是人类神奇精巧的大脑！

如果我像梭伦(古希腊政治改革家和诗人，传为古希腊“七贤”之一)那样，被问起谁是尘世间最幸福的人？我会毫不犹豫地举出哥伦布。这并不是说其他的发现都比不上他的：如德国人古滕贝格的，这不过是其中之一；而是说幸福还有赖于感觉上的效果，而在这方面，肯定是哥伦布的最为巨大。每当我踏上美国的土地，都会止不住对他有一种嫉妒的感觉，或是有一种止不住的狂喜，因为我分享了一点他的快乐。当然，哥伦布没能乘坐皇太子威廉号穿越大洋，他也没能亲眼见过纽约，但在他的脑海中，却可以想象到一百年或两百年后的纽约。

哥伦布业已成为发现者的典范。他的“向前，向着西方前进”，代表着他们的不屈不挠，他的“陆地，陆地”代表着成功的欢乐，而他的全部辉煌，都来自他确信：生命本身并不是最大的拥有。不以自己全部的生命为投入，你就永远不可能获得最高的回报。

所有的感觉，并不仅仅是美感，都可以在海上航行中得到完全的满足。丰盛的美味佳肴照应着人们的口腹之欲和味觉，一支小小的优雅的管弦乐队，也令人得以一饱耳福。我们维也纳作曲家的作品经常在这儿出现，显然并非真正伟大的那些，而是施特劳斯、伊万诺维奇、瓦尔德托伊费尔这样的。在喧嚣的喝彩声中，“多瑙河之波”在大西洋上流淌，而如果我们想到海顿、莫扎特、舒伯特，或是贝多芬，我们可以说“多瑙河之波”，就像席勒在说到伊尔姆时所说过的那样：“它们匆匆而过时的轻轻声波，让人们听到一支不朽的乐章。”

因此，没有比在轮船的甲板上更舒适的生活了，尤其是对于这样一些人，承蒙上帝惠赐，他们全无晕船之困，却能无忧无虑地观看着甲板上那些往来踱步的人。当偶尔水花突然溅起，全无预兆地喷射在甲板上和那些昏昏欲睡的日光浴者身上，使他们蓦然尖叫着跳起时，欢乐达到了高潮。

每次进入纽约港，我的心中都充满了欣喜。这些高耸入云的建筑和高擎着火炬的自由女神雕像俯瞰着一切。空气中总是传响着悠扬的鸣笛声和船只彼此间的唱和声：一只船发出沉闷的警告，另一只像是吃了一惊，回以尖叫；一只在欢快地鸣笛，另一只却以四度音在悲伤地哀歌；就像是歌手们无与伦比的旋律在回响。如果我是一位音乐家，我会即兴创作一曲交响乐：纽约港。

然而此时，我并没有时间去多愁善感。我即刻在霍博肯雇上一辆出租车，他把我先载到南太平洋铁路局办事处，然后从那儿可以直接去车站，全部只需3美元。但在办事处我才知道，我手中这一张折扣价车票的特快列车，每周只有两班，我必须在纽约再等上两天。我只好让出租车掉转车头，前往威斯敏斯特旅店，并有了时间对纽约勘察一番。

在纽约，你决不会感到厌烦。一次简单的电车旅行，就会供给你充分的娱乐和观赏的东西。无需车票，也没有过于拥挤或不同费用的规则。售票员用一种追逐的目光探寻着每一位新上车的乘客；乘客把5分硬币放在他的手中；此时，他拉动一条绳索，车顶上的现金记录器就会记录在案。同时，会有一声铃响，所有的乘客都可听到。如果乘客的位置靠近司机，他就有机会来惊叹其堪与拿破仑一世或毛奇将军*的指挥艺术相媲美的驾驶技术。他们以疯狂的速度直线前进，飞快地缩短着与其他汽车的距离，并迅速掠过。这一切与其他景色，都反映着纽约的真实生活。

---

* 1848～1916年期间德军总参谋长。——译注

到第三天，我的行程开始加速：在四天四夜的时间里，我从纽约直达旧金山。旅行者就像被放进发射器中直线弹射出去一样。当穿越无尽的车厢，去往餐车，或是观光车时，所受到的颠簸和撞击并不是很舒服的。观光车设在车尾，人们可以坐下，或倚在围栏上，但必须当心，不要在剧烈颠簸时掉下车去。

乡村景色总体上是单调乏味的，但高速运行中的观光本身就令人趣味盎然。从观光车上回望，车轨就像无尽的缎带，从车厢下面飞速地散开去。同样有趣的是，从一个木制的巨大水坝上穿越盐湖时，看到盐湖前后的区域都被雪白的结晶体所覆盖。经由谢拉·内华达趋向旅程的终点，也是非常美丽的：它使我想起了(奥地利的)塞默灵，那儿的风光尽管并非如此的景色如画，但是逶迤起伏、高耸险峻的山峦却同样地令人久久难忘。

由于在纽约的耽搁，我到伯克利已经迟了。暑期学院26日开幕，而我却直到晚上才到。由于当天都忙碌于开幕词、注册报到之类的琐事，如果我要在第二天上午9时准时开课，就得连一个小时也不能再耽搁。不幸的是我实在没法做到这一点——四天来的隆隆作响和颠簸起伏的旅行效果，此时显现出来了：我无法在坚实的土地上平稳地行走，晚上上了床，我也总是惊恐地无法入眠，因为我不再被摇摆颠簸，但却想象着是那样。

现在，我必须坦白：在第一堂课前，我总有点为怯场而烦恼，尤其是在这儿，当我不得不说英语时。我在旅途上用英语会话的机会，并不如想象的那么多。遇上会说英语的德国人，总是在几个词之后就又操起了德语，而遇到真正的说英语的人，根本就答不上碴。

下面是我的英语会话所采取的形式：

我：什么时候吃午饭？

他：咿呃呃噢噢。

我：求求你，你能告诉我，午饭时间是几点？

他气急败坏的程度下降了1/5：啊噢噢唔唔。

我意识到了我进攻计划中的错误，绝望地喊着：午饭，晤饭，吾饭，务饭，等等。我发出了种种古滕贝格的类型分类中从未出现过的元音。现在，他的脸上闪过少许理解的表情：噢，午饭？这样，理解的桥梁开始架通了。

我：什么时候？哪个时辰？几点钟？

他：一点半！

这样，我们才彼此沟通。可是现在，我被设想要用这种语言去讲30次课！因而，我宣布自己不宜在6月27日星期二工作，而于星期三开始。在第一次课上，我有点缺乏信心，但在第二次课上，我放松多了，而当最终听说学生能够很好地理解我的课，确实认为我的课清晰而且独具特色时，我很快就感到挥洒自如了。

此时，我不能不为这一成功感谢我在维也纳的英语教师——梅·奥卡拉根，没有她不懈的努力，帮助我训练我的口语，我真拿它一筹莫展。当我需要一些可用的粉笔，或一块大些的黑板时，我能那么自然地说出“黑板”和“粉笔”，我是多么自豪！我是多么流利地说出“代数”、“微积分演算”、“化学”和“自然哲学”之类的词！

多亏我的勤奋，我也能点一份极棒的龙虾沙拉。在菜单上写着“龙虾沙拉”，我立刻想起在课上，我几乎不能相信“螯虾”被翻译成“龙虾”；所以，我才能吃上龙虾，味道真是好极了。

我正工作于此的加州伯克利大学，是人们可以想象的最美丽的地方。1平方公里的校园中，有些古树经历了数百年的历史沧桑，要么甚至于上千年？谁能在一瞥之间说出它的年龄呢？在这个校园中，有着极现代化的建筑，但显然已经显得太小了；而新的建筑正在拔地而起，因为看来地皮和资金都不成问题。

整个校园笼罩在一股哲学氛围之中。伯克利是一位著名英国哲

学家的名字*，他甚至被誉之为发现了人类大脑所产生出来的最愚蠢的思想，即哲学唯心主义，它否认物质世界的存在；这与我使用的理想主义(英文中为同一个词)有着极为不同的意义。在伯克利，哲学有着它自己的教学结构；不是指由语句和怪想——对不起，我的意思是说逻辑结论和理性概念——组成的系统，而是由砖瓦木料建成的真实的结构：在那儿，音叉、光谱、示波器和录音仪等等被用来探索人的精神活动。

另一幢建筑对于我来说则更为重要。一位爱思辨的旅馆老板从百科全书上读到伯克利是一位英国主教，他的住宅被称为克洛因庭院。因此，他为教授们建造了一所公寓，取名克洛因旅店；这就是我的住处。在外观上，这座旅店并没有刻意去模仿较早期英国主教宅邸的风格。它坐落在欧几里得大街上，呈精确的平行六面体，并无一点非欧几里得几何的痕迹。但旅店的内部却很舒适。我有一个小卧室，一个较大些的书房和一个浴室，都装有电灯。热水通过粗管在四周循环，保证室内相当温暖。尤其是纬度在巴勒莫南方的7月份，这是相当受欢迎的，因为此时来自太平洋的风还是寒气逼人的。另一方面，伯克利的冬季只比夏天冷一点儿；在冬天有着大量的降雨，而在夏天则几乎没有。

这儿的食物不错。至少能迫使自己吃下提供的食物中的一盘。没有印好的菜单，而是在每一次餐前由女服务员们慢吞吞地报出来，这些服务员大多数都带着眼镜，而报出的菜单就像是小声吟唱出的单调的歌。

“纯真的生命欢乐并没有分配给俗人”，即使在前往伯克利的旅行中也是如此。首先，我的胃会有话要说。直到我抵达那儿之前，我既没有喝上瓶装水，也没有喝过碳酸饮料，这样保证了我的胃的健康，不管吃下去的食物对不对胃口。但伯克利是绝对禁酒主义的：

* 即贝克莱。——译注

饮用和零售啤酒、葡萄酒是严格禁止的。由于我不想为了酒瘾而献身，我只好试探着喝水，不加冰——或许这在伯克利要比在纽约和圣路易斯更健康些。但不幸的是这并不奏效！我的胃造反了，在有一次一整夜地穿着衣服，以免太频繁地穿衣和脱衣之后，我冒险向一位同事打听葡萄酒批发商的地址。我的问题所产生的效果，使我联想起在萨克拉门托和奥克兰之间的火车上的吸烟室里的一幕。一位印度人加入了我们，他非常幼稚地询问这么一种地址……让我们这么说吧，因为他是一位印度人，所以他问旧金山住有印度舞女的地方。在座的烟民中的大多数都来自旧金山，那儿也的确有以“你给我钱，我就给你甜蜜”为座右铭的姑娘们，但每个人都为这样的问题吃了一惊，并很觉尴尬。我的同事在被我问起酒商的问题时，所表现出来的正是这同一种反应。他先担心地四周张望，以免有人听见，然后估量着我，看我是否真的可靠，最后才给了我一个在奥克兰销售加利福尼亚葡萄酒的很好的商店名字。我设法弄了一整箱的瓶装葡萄酒，从此，我在奥克兰的路上又找回了感觉。我的胃也对此说“阿门”，并很快就令人惊奇地恢复了，尽管我的膳食仍然如旧。我总是不得不偷偷摸摸地在饭后饮用我的葡萄酒，弄得我自己都几乎觉得我已沉溺于恶习之中。禁酒正在创造出一种新的虚伪，而在这个世界之上，这种虚伪已经够多的了。

我的胃在别的病疼来临之前，很少会有安宁。以前，我的讨厌的哮喘总是自我一踏上蒸汽船就消失了，并且直到我回到欧洲之前都会躲得远远的。这一次也还一样，直到我到达加利福尼亚之前：倍受赞赏的湿冷气候招来了不受欢迎的客人——哮喘来折磨我了。

接着，我的胳膊上又长起了疖子(我想，是因为穿上了未经洗过的新衬衫的结果)，我只得去罗斯福医院作手术挑破它。能去如此彻底地了解一个其雅致堪与恺撒·威廉二世(当然，我指的是汽轮船)相媲美的美国医院，当然是十分令人感兴趣的事，但其价值却是35个美元。这是在整个旅程中，我让自己享受过的最昂贵的奢侈品了，

从而剥夺了我那不多的值得怀疑的愉快。7月4日星期二，是独立日，美国的伟大节日，而由于我周六和周日没课，只需免去周一的课程，或是以后再补上它，就可腾出四天的时间，快速地出游一次约塞米蒂湖流域。这一计划未能成行，但作为补偿，我至少还是在7月2日星期日，去听了“半小时音乐会”，这是每周日免费在希腊剧院举行的。在我看来，这是雅典的索福克勒斯剧场的复制品，只不过规模稍许大些。由于伯克利夏季从来不下雨，再加上常常是薄雾弥漫，少见阳光，露天剧场生意不错。然而，在这种建筑优美、四周桉树和“生命之橡”环绕的地方，音乐的听觉效果自然要差些。这里，倒是马勒和爱乐管弦乐队演奏《第三交响曲》的最佳背景，演奏进行之中，树木会人迷地轻轻摇晃，而太平洋也侧耳倾听，变得更加宁静；尽管人们对此并不理解。

星期二，在克洛因旅店的屋顶上，我观看了每年例行的为庆祝独立日而燃放的壮丽的焰火。克洛因旅店坐落在高地上，可以观看到旧金山海湾、金门大桥、塔马耳派斯山等景点；英国主教从他的克洛因庭院，不可能看到更美丽的景色。

上帝本人也会从这盛大的庆祝活动中得到欢乐，为此他率先让太阳落山，让焰火表演更加精彩，让他本人的伟大和创造性得到更充分的展现。在我的美国之旅中，像往常的那样，我真希望能挥笔作画。

日落的余晖消失后，旧金山的灯火在海湾上空交相辉映，尘世间的焰火开始了。一会儿，灿烂的闪亮突然在我们脚下燃烧；一会儿，一个灼热耀眼的星球照耀在地平线上。到底我该看哪一个方向？伯克利和旧金山焰火辉煌；在奥克兰上空，有一个引人注目的表演。而一旦我看着这个方向，我就拉下了阿拉梅达上空甚至更好的焰火。我决定今后每年的7月4日，我也在自己家的花园里举行一个小型的焰火表演。毕竟华盛顿和他的追随者们的斗争不仅仅具有局部的意义，而且具有世界性的意义。

席勒曾经说过：“有成千上万的人像我这样，德国就应成为一个

共和国，而曾经反对共和国的罗马和斯巴达，则成了女修道院。”显然，这并没有成为现实。有几千个像你这样的人？世界上甚至一个这样的人也还没有产生出来。但思想不会死亡。这个在它面前罗马和斯巴达都成了女修道院的共和国，的确已存在于大洋彼岸，它是如此的巨大，它是如此快的成长！“自由培养巨人”。

随后的每个周末，我总是被邀请到不同的地方去。第一次邀请，是去赫斯特夫人在利弗莫尔附近的壮观的庄园。赫斯特夫人是谁？这对欧洲人可不容易说得清楚。最近于正确的说法是，她是(加利福尼亚)伯克利大学之母。在欧洲，学校之母是一种经典的理想化人物，而在美国，她是真实的人物，并且最重要的是，她有百万美元的现钱，每年她都要捐一些用于大学的扩建；我对美国的访问，自然是要用她的钱来付账的。大学校长(我们应称为校长，但他这个职位是终身的)是理事们的执行代理人，而在这些理事之上的，是赫斯特夫人。目前这位在任的校长确保了在聘用人员上的所有权利和特权，从而他至少能凭他本人的权威为大学做些事。

利兰·斯坦福初级大学的条件甚至更坏——但我怎么能说“更坏”呢？任何一个像我这样，因为赫斯特夫人的好客而享受了许多幸福时光的人，怎么能对这么一位学校之母所行之事说一个“坏”字呢？——因此，应该说甚至更苛刻，我对这所大学作了一天的访问。

老利兰·斯坦福先生负责修建第一条太平洋铁路，即第一条贯通大西洋与太平洋之间的铁路。他在国会中也很有影响：他懂得如何恰当地说明这项工程的重要性，并劝诱国会投下了一半的建设费用，由他保留某些统治权，而把收入主要留给建设者。然后，斯坦福先生建立了一家名称完全不同的公司，为铁路公司提供材料和劳务。由于他同时是两家的老板，就很容易设法使一家以双倍的价格把东西卖给另一家，而政府名义上出的是一半的钱，实际上支付了全部费用，而他则回收所有的费用。

正当他变得腰缠万贯之时，一场突然的不幸夺去了他惟一的儿

子，他的全部家产可以说都是为了他。他和斯坦福夫人，尤其是后者，都陷入了一种宗教狂热。在欧洲，当一位老夫人趋于轻微的疯狂，她会为自己买上一打猫或是鹦鹉；而在这儿，她召集了第一流的建筑大师(你有了钱，有什么得不到的？)，建造了一所大学，这是真正可以流芳百世的给予未来一代的祝福。

与伯克利大学外形上的一系列的大屋顶相对照，斯坦福则是按照一个统一的、有吸引力的建筑计划设计的，但这一计划看上去并不适合于教学目的。世界各地的建筑师都如出一辙。大学的教堂特别的宏伟，墙壁和天花板上用彩色玻璃和雕塑装饰得富丽堂皇。管风琴当我在场时曾经演奏，它的声音听上去是如此曼妙，使我心甘情愿地成为这种音乐的虔诚的听众。然后，她也去世了，但这已是在按她的意愿为大学提供了慷慨的资助之后。

斯坦福大学的一位政治经济学教授，曾被认为是猛烈地抨击了学校创立人的欺诈行为，大学校长为了在斯坦福夫人面前表现一下自己，决定当即开除这位教授。然而，斯坦福夫人倒是挺宽宏大量的，她请回了这位教授，并谴责了过于献殷勤的校长。

当然，这并不是说在这种大学里，男士和女性有着同等的权利。我可以引证一个极端的例子，来证明女性们所获得的广泛的权利：我的一位教学同事——我还记得她的名字：利莲·塞拉芬·海德小姐，一位非常好的女士——曾作过两个小时的如何制作色拉和甜点的讲演，像我的讲演一样到处张贴海报。我现在还可以给你看我收藏着的演讲日程。

校园里所有的房间里都挤满了妇女；女生的人数肯定几乎与男生不相上下。尤其引人注目的是，在每个房间里，都存放着一顶女帽。在教授的房间里——一顶女帽；在用作盥洗室的房间里——一顶女帽；在公用电话间里——一顶女帽；真的，当我离开医院时，即在上面提及的那个手术之后，由于有些虚弱和眼花，我下意识里差一点把一顶女帽当作我自己的戴在脑袋上。

现在，让我们回到赫斯特夫人——伯克利的学校之母的话题上。如前所述，她邀请了我和其他一些在暑期学院讲课的教授去她在利弗莫尔附近的庄园做客。这个庄园，是只有既奢华、富有又有品位的人才能以如此过度装饰的方式创造出来的一个珍宝。四轮马车在火车站上接到我们以后，没有多久，我们就经过了一个富有独特的想象且很有吸引力的庄园大门，进入了满目是高大的树木和艳丽的花草的花园。这里，花钱如水，毫不吝惜，在加利福尼亚，鲜花在夏冬两季都可以绽放如春。车子缓慢地——尽管在我看来还是太快了些——穿过了花园，在这儿，也可观赏迪亚布山和哈密尔顿山的美丽风景。终于，我们来到住宅的前面。整个建筑在风格上是葡萄牙-墨西哥式的，一圈建筑中包围着一个庭院，前面有一扇沉重的铁门，明显地像是一座堡垒。庭院中央是一个古代的大理石喷泉，是由我们的女主人从维罗纳跨越了太平洋带回来的——整个庄园都用它来命名："维罗纳庄园"。

马车上的一位同伴向我们说明，女主人曾召来了一位名叫施魏因富特的德国设计师，他在研究了所有墨西哥的老式西班牙和葡萄牙建筑之后，设计了这个建筑。我评论说："他肯定有着很好的品位。"但我的同伴却回答说："是呀，他也因他的好品位而死。"我赶紧问："这是怎么回事？"他说："加利福尼亚葡萄酒的味道对他来说很好，他直到死都在喝它。"这些加利福尼亚人，总是对于他们公认的很浓烈的葡萄酒有着敬畏的想法。不管怎么样，这还不算太坏。终有一天，我也会谢世，从而不再饮酒，因而我也将继续抿着它，直到死亡。

住宅里面简直就像是一个藏满华丽的艺术品和古董珍玩的珍宝盒，它们都是其主人从古老的世界和新大陆的各个角落搜集来的：一个来自古希腊、古罗马、中世纪、墨西哥、中国、日本和印度的珍宝的大杂烩。

在饭桌上，我坐在了赫斯特夫人的右边，因为我是惟一的欧洲客

人。第一道菜是黑莓，我没有吃。接下来的是甜瓜，为增进口味，女主人专门亲手撒上了盐，我又没动它。然后是燕麦粥，一种无法描绘的糊状物，在维也纳，人们可能用它喂鹅以催肥——但也可能不用，因为我怀疑维也纳的鹅也不会愿意吃它。我已经注意到当我不吃甜瓜时，校母的脸色已不太好看——即使是校母，也会为自己的烹调手艺而自豪。因此，我把头扭向一边，作干呕状，感谢上帝，幸亏我并没有真呕出来。在美国接受邀请是件不愉快的事。在旅馆里，你可以剩下不想吃的东西，但面对着这样的一位家庭主妇，她常常为着高质量的美式烹调，而尤其为自己的烹调而自豪，你该当如何呢？幸运的是，接下来的家禽、果盘和其他食物可以用来压下燕麦的味道。

饭后，我们走进音乐室，我估计这间房间有会议厅那么大，但它的巴洛克式装饰是多么奇异！若就美丽而言，我敢说没有一个小一些的维也纳的音乐厅能与之相比。我的那点不够水准的钢琴弹奏技巧也风传到了这里，因而被邀请来为音乐会开场。在再三推却之后，我坐在了这架巨大的钢琴前，这是一台最高价位的施坦因韦钢琴。毋庸置疑，我敲响了琴键；我或许在音乐会上听到过有如此美妙的声调的钢琴，但我的手指头却从来没有碰过这样的钢琴。如果说我的加利福尼亚之行途中所受的困苦曾使我为之后悔，那么从现在起，我再也不会这样了。我演奏了舒伯特的奏鸣曲。显然一上来，我觉得对它还有些生疏，但人们对于好的东西熟悉起来总是很快。第一乐章的第二部分，我弹得已很自如，而到第二部分行板，我已经完全忘记了自己：不是我在演奏旋律，而是它在引导着我的手指。而到了快板部分时，我必须强行抑制自己不再这么弹，所幸的是我的技巧还能跟跟跄跄地跟上。柏林的巴尔特的一位学生演奏了下一曲，不仅技法娴熟，同时也充分体现出对音乐的理解。在出席者中，还有一位来自密尔沃基的音乐教授，一位有着军人般气概的人物，就像是一位豪迈的猎熊人，但也受过良好的音乐教育。他也曾

师从巴尔特，但怎么也不能说是研究过音乐。他知道贝多芬写了九部交响乐，而第九部是最后一部。他向我表达了我不应得的敬意：在争论音乐是否也能富于幽默时，他要求我把第九交响乐演奏成谐谑曲。我怎么能在一位来自密尔沃基的教授面前认输呢？我不无幽默地说，“我非常乐意，但我恳求你用定音鼓来伴奏，这样演奏的效果会更好一些。”这样一来，他终于沉默了。

夜晚，我在一个配有专用浴室的豪华的卧室里就寝，并有我个人的黑佣服侍，他还帮我擦了鞋。一个完美的守护神正挂在我的床的上方。我是特别喜爱艺术的，当它能为我提供精神食粮时。无论它有多么壮观，在家里挂上一幅阿布基尔战役的画像对我有什么用？但床顶上的守护神在某种程度上，表达着主人的希望，希望我在他的家中能够美美地睡上一觉。是的，我这个人还真有点迷信。刚才我还在为气喘难受，两次想到庄园里去，守护神安慰了我，第二天起来，持续的气喘病真好了。

接下来的一天里，我们在住宅和院子里到处巡视着各种有趣的东西。除此之外，我们还驱车去观赏了巨大的“生命橡树”（加利福尼亚“生命之橡”，一种常青的橡树），它的树枝都伸展开来：在有的树杈上还盖有小棚子，就像屋顶的小阁楼。直到下午，我们才启程返回，到达伯克利已是晚上很迟了，我还必须做好准备，以便第二天能准时出现在报告厅。

随后的一个周末，用于去利克天文台。实际上，我从星期五下午就访问了圣何塞的这个小城镇，它的许多街道上都排列着棕榈树。人们不仅仅在棕榈树下散步，他们也在树下乘着电车、自行车和小轿车出行。第二天早上7点，我登上一辆已有些破损了的邮车，前往哈密尔顿山，它的海拔和奥地利的塞默灵山一样高，但看起来却要更高些，因为旅程的出发点只稍微高于海平面。路面修得很好，缓慢地盘旋弯曲，在葡萄园、果园、森林和草地的簇拥中逐渐向上。草地上在这个季节覆盖着干草，牛在夏季吃的是干草，而在冬季，吃的

是草地上新鲜的草。

邮政马车的车夫，一位性情乖僻、爱发牢骚的老人，也是一位邮递员。一离开旅馆，他嘴里就开始嘟嘟囔囔地，从躺在我们脚下的邮袋中分拣邮件。我们很快离开了小镇。在一处围着栅栏的大宅子门外，一条可爱的狗用急切的叫声迎接着我们。车夫把一些信件塞进一捆报纸，熟练地把它们扔进这个杂种的嘴中，它立刻就衔着它们钻过栅栏跑了。这样的投递方式在几个院子门口重复了几遍。而在其他地方，则是竖起一根带着一只大盒子的木杆。无需停车，车夫就能灵巧地取出要投递的物品，并把新到的邮件放进去。只有几次，当有杂品袋或是其他大件的包裹要投递时，或有侍女在等候时才停下车来，侍女的种族，恕我没有资格作人类学的鉴定。我们换了两次马匹，吃了一次午饭。（但请别问我这顿饭吃得怎么样！）

午后一点半，我们到达高耸云天的天文台。只有年轻的天文学家们在这儿，由塔克博士负责，因为台长坎贝尔和其他资深的天文学家都已前往西班牙准备观察日全食。由于此时我仍然想着自己能否也去观看，我问塔克博士在哪儿观看日食？“在达罗卡－阿泰卡－阿尔马桑。”他回答说。我茫然地看着他，嘴里不自觉地说这“对我来说全是希腊文”。他平静地说，这确是一个位于马德里东北方的西班牙村庄。这个地名没给我留下太深的印象：西班牙对我而言，似乎像是什么不相干的地方。

他们向我展示了这个装备豪华的天文台的所有资源，它们在这个得天独厚的位置，能得到有效的应用。最令人瞩目的，是那个由阿尔万·克拉克打磨的口径 28 英寸的巨大透镜——他们就把它叫做“大玻璃”，借助它，作出了近些年来最令人感兴趣的天文学发现，这就是火星的孪生卫星。在支撑着这个望远镜的巨大底座里，埋葬着公民利克，他用他私人的力量，建立起这整个天文台。这不是一种理想主义吗？我能理解他的想法。他确实知道，他的尸体葬于何处对于他来说已无关紧要，但他想以此惊人之举来向世界表明：一个

百万富翁的最终目标应当是什么。我断言：他借他的财富，已使自己得以永垂不朽。

如果我是一位诗人，我将用诗句来描绘席勒与利克的天堂相会，题目就叫“两位理想主义者”。席勒让智慧对财富说：“我不需要你”。利克证明了相反的道理。显然，得自于钱财的激动不过是一种第二等的欢乐；通过钱财获得的爱，甚至连三等的欢乐也算不上；然而，通过钱财，却可以获得施坦因韦钢琴、阿马提小提琴、伯克林，等等，同样也可获得永恒。

在这里，我想说另一个联系到理想主义和赚钱的故事。伟大的美国物理学家罗兰曾作过一次演讲，说学者不应致力于赚钱。一年以后，他得了病，经医生检查，他至多还可以再活三年。他有妻子和四位还不能自谋生路的孩子。在与忠实于自己的信条的冲突中，对家庭的热爱占了上风。他发明了一种电传打印机，申报了专利，为他的妻子积聚了20万美元的财产。此后不久，他就真的撒手人寰了。然而，他也因此违背了自己的原则。尊敬的读者，您知道我最赞美罗兰的是什么吗？这就是他有着这么一个一切就绪的能赚钱的发明。祝愿他也在天堂里与席勒互致问候。

美国的商人在赚钱时，明显是现实主义的。因此，一位非常聪明的商人在我向他解释我访问的目的时，就是不能理解在我的收入仅够支付旅行费用的情况下，为什么我要跑到旧金山这么远的地方来？

我站立在支撑着望远镜和守卫着利克先生的遗体的底座前，如此地浮想联翩。然后，我们接着参观天文台的各个部位。物质财富在这儿得到了最好利用。天空的每个区域都有着各自的橱柜，而在这些橱柜中，每个星体都有各自的抽屉，这样所有的观察资料都能迅速地找到和使用。储存的内容增长得很快，而毫不惊奇的是，在这山顶隐修的天文学家们的日子过起来也很快。不用说，在这儿，也有着相当漂亮的女天文学家。

晚上，在通过巨大的望远镜观看了几乎像月球表面一样巨大而明

亮的火星后，我开始打道返回山谷。 途中最值得注意的是一条雾的分界线。 我们的头顶是星空，而脚下则是像平滑的海面一样的薄雾。 几乎只在瞬间，马车驰进了雾中，星星不见了，而马车的灯光只照亮了前面很短的路面。

第二天，我们在圣何塞旅游，但我在下午就回到了伯克利，以便有充足的时间睡眠和备课。

我的下一个周日远足没那么有趣：游览海滨胜地蒙特雷，太平洋园林和圣克鲁斯。 我在旧金山，就已经驱车大洋之滨，欣赏过这样的景色。 这一次，我能更长距离地来赞美大洋边的悬崖峭壁和大洋中波浪的舞姿。 但所有这些景物中，最令我兴趣盎然的，却是太平洋园林中的一座小屋，这是勒布教授的实验室。

在庞大的工业厂房和科学家的实验室之间，有着多么大的差别！远洋汽轮是何等令人瞠目结舌的庞然大物！ 几次航行下来，你就会发现官员、机械师和水手都在做着同样的事。 在船舱里，同样的人在谈论着同样的事；在甲板上，他们在同样的躺椅上伸展着身躯；都玩着同样的以上层甲板为目标的游戏。 巨大的量，而不是新的思想在被发现着。 我赞同，在科学中，许多事情只有通过量的发展才能获得(我们在利克天文台中已看到了这一点)；但真正伟大的成就(显然，我们的教育部长最好别听见这句话)总是最小的手段取得的。

为了一个伟大的国家的福利而支配着千百万的花销，率领着千百万人去夺取战役的胜利，这些无疑是伟大的成就。 然而，在我看来，更重要的似乎是在简朴的房间里，用着有限的资金来发现真理——当对这些战役的记忆仅保留在矫揉造作的历史书中时，真理将仍然是我们知识的基础。 在那些来自整个希腊和罗马文化的东西中，究竟是哪些依然生机盎然，并且比以往有着更多的应用和影响？马拉松的勇士们已经被超越，那些从阅读荷马和索福克勒斯的诗句中获取快乐的人们也已过世，但毕达哥拉斯定理和欧几里得原理却是真正不朽的。

这些是我的一般性见解；至于特殊的，它多大程度上适用于太平洋园林，则只有留待未来的发展来证明。若干年前，当在那儿作出的发现仍然新颖时，曾有一次令我极为窘迫。我充满着热情在同伴中说明着它，却决没有想到如此真实的事，既不想唤起情欲，也确实不可能这么做，竟会被看作是不合时宜的。第一个证明是坐在我旁边的一位女士，她突然地，多少有些引人注目地退出。后来，还是这位女士，她唱了一首非常暧昧的阿莱特的歌。我忍不住说，我很惊奇，这首歌倒会是合适的，而我的话题却不合时宜。“是的，”这位女士说，“我们不理解你的话题。”我不自觉地又回了一句：“但你倒是挺理解阿莱特的”。这是我们由来已久的虚伪之一，而绝对禁酒主义者可以算是另一个。我必须仔细地选择我的用语，以说清楚勒布研究的目的，而不致有所冒犯。

长时期以来，人们相信生物体中所发现的所有所谓的有机化合物，都只能通过一种特殊的力：活力来产生。今天，已知一些有机化合物能由它们的化学元素通过一般的化学反应来合成，无须活力的出现。但是，许多人相信，生命本身是某种特殊的东西，与相伴随的化学过程全然分离，生命特殊的运作绝对不可能由无生命的物体所产生。这种观点的确并没有为勒布的研究所否认，但新的砝码已加到了天平上对其不利的一边。

众所周知，有些属的动物，雌性的卵在某些情形中无需受精，即可孵化出来(孤雌生殖)。现在，勒布用那些绝无此类事情发生的动物的属，如海胆和海星来实验，证明通常雄性的精子在它们的卵子中所产生的反应，也能由完全无生命的酸来产生，因此易受碳酸、酪酸，或戊酸影响的卵在适当的条件下，可以与通常受精卵完全相同的方式孵化出来。

这一发现的重要性是显而易见的，即过去被认为是特别的活力作用的过程，也能通过纯粹的化学反应来产生。如果这不仅适用于海胆，而且适用于更高等的生命，甚至于人，那将会导致怎样的社会革

命！ 今日鼓吹妇女解放的人连做梦都不会想到有这样的妇女解放。到那时，男子将成为多余的；一小瓶精心调制的化学品就完全取代了他们。 有可能以比现在远为理性的方式，来安排遗传，让它服从于这样的变化。 不用太久，就会有人发现用哪种化合物能繁衍男孩，哪种繁衍女孩，而由于前者(男孩)是完全不必要的，只留少数样品作为动物园里的稀有动物。 显然，到那时，葡萄酒也就成为多余的了。

从太平洋园林，我乘车前往圣克鲁斯，它以如下事实闻名：大量的游客不是住在旅馆里，而是住在就像假日别墅一样出租的带有亚麻布窗户的帐篷里。 其他的人则住在小船的木制船舱里，这些小船可以在海湾和河口的浅处划行。

每到一地，我都为那些小巧的房屋所打动，它们几乎都是木制的。 在伯克利，有着许多房子，都会使我想起格拉茨附近的那些属于能工巧匠们的小屋，它们都是在他们自己的一小块地上用木板建造的，装饰着各式各样的雕刻。

在另一场合，我曾看到过那些所谓的“老树”，它们都有着上千年的历史。 一棵死树的树桩显出的年轮，可以准确地告诉我们它已有多少岁了。 明确的数字，我已记不清了。

别的时间——星期六和星期日之外——都忙于工作，但也不是完全没有娱乐。 有几个社交聚会，其中有一二个还相当正规。 有一次，那位邀请我出席聚会的同事曾事先警告我，要穿上晚礼服，表现出真正的英国式的得体风度。 当他进来时，我叫住了他，问他：“怎么样，我的形象够光彩照人的吧？”但是不！ 天哪！ 我忘记擦皮鞋了。 我的同事颇能应付自如。 他把我领到底层，取出他的夹克，旧外套和护腕，从一个柜橱中找到必要的装备，以熟练的技巧帮我擦起鞋来。 然后，他又用往蜡上滴水的杯子大口地喝起水来。唉，美国人呀！

在社交圈中并不缺少女士。 伯克利教授的夫人们也参加了交际演讲会，(在克洛因)旅馆老板的妻子和她可爱的女儿们，其中有一位

唱起歌来非常动人，也同样参加进来，还有别的女性朋友们。我经常参加这种聚会，并被另一种前面未提到的疾病——诗文瘾击倒了。由于我已经描述过我的其他不适，我想也谈谈这种病。以下就是这种病的一种产物：

致我的妻子

是否，我不应在遥远的地方，与陌生的女士逗乐消遣？
难道不是她们，在这里所有的事物中，与您最为相似吗？
经常，我亲吻着卡纸板上你的像片。
噢，原谅我，尽管亲的是你的像片，我却如见你本人！
始终如一，我是一位彻头彻尾的理论家，因此
请相信我，亲吻也只是理论上的。

所以，原谅是全方位的，也包括由亲吻引起的。这不过是一种必须用诗句来表达的情感。我倒愿意看到有的人写出诗来，除了相伴散步、聊天、网球和演奏音乐之外，再无其他内容！

加利福尼亚的女士块儿大得惊人，体格健壮，与她们的面包长得一样，经常让人食欲全无。我不能不同意一位同事的说法："你不觉得美国妇女有些阳气过盛吗？"但另一方面，他却不同意我的回答："而男士却有些女子气。"后一句只有在他们没胡子这一点上是正确的；而他们的男子气概，在强有力的意志、勇气、事业心和性格中却得到了充分体现。

给我们平淡的讲课时间带来了一些变动的是美国国防部长的造访，他是在前往菲律宾的途中经过旧金山的。据推测，罗斯福小姐也在他的随行人员中，但我没能看见她。国防部长先生出席了在伯克利大学的巨大而生气勃勃的橡树种植园中举行的公众聚会。你真该听一听如此简洁直率、热切真诚的讲话！一个简单的例子，伯克利的校长在简短的致辞后，以这样的语言来介绍这位国防部长："这

就是塔夫脱先生！一位不错的国防部长，一位不错的公民，而首先，是一位不错的老家伙。”

是的，美国人还能取得伟大的成就。我相信这个国家，即使我看到在从事某一项工作时，他们并不能胜出，这就是理论物理讲习班上的微分和积分。他们在这儿的表现，多少有些像我在跳过水沟和爬山时的表现，在伯克利的校园里，这样的水沟和山包实在是太多了。

终于，当我最后一次听到戴着眼镜的女服务员歌唱一般的嗓音时，告别的夜晚到来了。当我把最后一个煎鸡蛋切开时，靠近我的一位同事用猎狗般的目光盯着这些碎片，告诉我每片只有片刻的时间去享用。然后，我就被火车抓了进去，拖着离开了伯克利。首先去的是波特兰，在车上过了两夜。尽管那儿有个很吸引我的博览会，我还是径直往利文斯顿，又在车上过了两夜。旅程是美丽的，如果全是白天就更好了！最为壮观的景色是沙斯塔山，漫山遍野是郁郁葱葱的亚热带植被，而山顶则终年为积雪覆盖。一路之上，途经了许多为群山环绕的湖泊，而这些山本身则层层叠翠，为森林所环抱，其山色之雄峻，令(奥地利的)格蒙登山和阿特塞山望尘莫及。山麓之上鲜有人家，我甚至怀疑它们有没有名称。关于黄石公园，我不想多说什么。这简直是一个奇迹，我怀疑这样的奇迹是否还会在别的什么地方存在。你可以阅读《导游手册》，或是看看精美的图片，但最好是亲身去看一看，如果你有足够的时间、金钱和好心情的话。不要像我这样，最好在6月初，当天气还不那么热的时候去，花上两周，甚至更好是一个月的时间，以便从容地去观赏一切，逐渐地从惊奇进到品味。

有那么多的好事可做，我也真是负担过重了。接下来，我又在车上度过四个夜晚，我的欣赏力也像我的干净的换洗衣服一样，耗用殆尽了。此外，车上供给的热量也令人难以忍受。我不断地用手巾擦拭着脸上的汗水。所幸，在美国的列车上总有充足的手巾供应。现在，我可体会到什么叫汗透的衣服了。这还不算，美国人喜欢把

他们的车厢与世隔绝般地密封起来，不是害怕穿堂风，他们不知道这个，而是为了避开煤烟。在这条线路上，没有在煤烟较少的线路上的那种挂在最后的观光车。我有一次把我这个包厢的窗户打开了一会儿，它在我的位子前面一些，但我很快就变得灰头黑脸，以至于如果下个世纪会有一些学者提出假设：黑人之所以如此之黑，是由于他们总是被雇佣为铁路工作人员的话，我也决不会为之惊讶。

此时，我的胃病又犯了。在餐车上能有酒喝，但很勉强，只有当大多数食客——尤其是女士们——离去后才行。首先拿来的是一杯冰水和一张纸条，你必须把你所要的一切马上就在上面写好。一段无穷无尽的时间之后，这张纸条才会被取走，再以后，你就只能口干舌燥地面对着一个冰水杯。我真抵挡不住(天使此时降临)喝上几口毒药的诱惑。

然后，突然我干脆喝不上酒了。对此的解释如下：整个北达科他州干旱少雨，当列车穿越它时，无酒可售。“我不在乎什么北达科他，”我抗议说，“我只想去维也纳。就我而言，你们让我过胡椒地也行。”“噢，这儿是长着许多的胡椒。”他们回答说。我的主啊！在这个国度里，我们最厉害的咒语也全然失效了。当然，通过小费和其他东西，我还是能有酒喝的，但这只能偷偷摸摸地进行，也不会有什么“公平交易”。

美国铁路当局通常在人满为患时，增加一节车厢，列车总是长得吓人。单节车厢像轮船一样，也有名字，否则旅客很容易找不着地儿。我先后坐过桑特·伊莎贝尔，彭比娜，维恩道尔。它们都挤满了来自各个民族的人，由于热得可怕，穿得都很少。有一个婴儿，始终全身赤裸，躺在光溜溜的座位上，这使我想起了基督之子，他肯定没有乘过普尔门式火车。我想作为一种赞美，对婴儿的母亲这么说，但在英语中这听起来会多么可怕？！

非常幸运，我没有生而为说英语的人。我也没法克服这一障碍。如人们所可以想象的，在需要表示关爱之情时，我总是十分窘

迫的。“他看进去，好像他必须看穿这个阶梯教室。”摩菲斯特如此说。的确，如果我无需做别的，只用走进课堂，所要面对的，也只是那些坐在我面前，学习物理学和形而上学的女士，那该有多好！但是站在我面前的，是一位可爱的、年轻的姑娘。事情难以进展，但当我悟出事情的关键，我们祖先的智慧和品位帮助了我，因为他们发现了最好听的单词，来表达最高贵的情感：爱。就像当我弹奏施泰因韦钢琴时，我并没有去支配我的技巧，曲调催着我向前走，结果我成功了。如果我不得不用英语说同样的事：“我爱你。”我所选择的新娘就会掉头而逃，就像母鸡会利用想抓它们的鹰隼的喘息之机，落荒而逃。

这种各色人等的旅客到了夜晚，都得挤进床上去。美国人的卧车是这样安排的：一条相当狭窄的走廊穿过车厢中间，走廊两旁是两人一间、装上垫子的座位。每个旅客都有这么一个座位。到晚上，过道同一边相向的两个座位拼成两排铺位，在过道处拉上帘子。床的纵向与列车行进方向一致。也可以把两个铺位合二为一——享受整个单间——但价钱翻番。由于没有抽屉，睡衣和拖鞋等物件必须装进一个箱子，由侍者放在床位上。每个人都只好在他们的帘子后面脱衣，在床上找到放衣服和箱子的地方，然后再不致窒息地睡眠。

每个单间都装有带着细眼的小通风孔，引入新鲜空气，而在炎热的季节，空气都雾蒙蒙的，我干脆赤身裸体地睡着，也省得打包开箱。有一次，我开了一整夜的窗户，当第二天早上起床时，黑人侍者竟对我以“兄弟”相称。

为避免丢失我的手表、钱包、眼镜等，我把我的帽子放进粗眼的行李网（整个睡眠单间中惟一的储藏地）中，并把所有这些小物件放在帽子里。黑人在铺床时，总要把我的帽子吊到一个够不着的高度，这一来，当我在床上要拿我的帽子时，他那个为难劲儿，真是可乐。

最不方便的时刻，是把座位转变为床的时候；在床还没有铺好，无法坐在座位上时，我逃进了漱洗间，但这里，一个旅客正忙着从衣

服上往下刷尘土，另一位则正在水花四溅地洗衣服。我想去车上的酒吧间，这并非每辆车上都有的，但问题是我不得不穿过7至8间已经在作夜晚准备、挂起了帘子的车厢。这些帘子是活的：来自每个床上隐蔽处的一只胳膊、一只脚，或更柔软的东西对付着被过往的风吹动的帘子。此外，人们总是会跌倒在地面上突出来的行李上。最后，我发现有一间里的座位还完整未动，而过道对面，已支起了床，帘子在不停地动。在不歇息的妇女这一概念中，肯定包含着一些真理。当我在维也纳大学的报告厅里，要求举手表示时，我只能看到学生的这一部分，但我总能即刻辨别出每只女性的手。因此，我确信这个帘子后隐藏着的是女性的躯体；最终，当住宿者脱衣的动作不小心，果然露出了女性的面容，证明了我的正确。而在早上，由于我早起的习惯，就避免了许多不方便。这样，我就能独自穿衣漱洗，然后，我用已为俾斯麦引用过的莫扎特的曲子来召唤他们："你们应当早起，跟在我的后面。"

最后，我被炎热、煤烟、胃肠不适和酒瘾弄得实在厌烦，不仅决定放弃日食，而且决定立刻与"恺撒·威廉二世"联系，它能载着我最快地回家。但刚巧遇上一次电报局员工罢工，其结果是耽误了六个小时。我为此大发雷霆，但美国人的冷漠行为简直令人难以置信。他们用一种几乎是怜悯的表情看着怒气冲冲的人，就像是正在对他们自己说：这个可怜的人，以为他的盛怒会于事有补似的。在我的这个事例中，电报员只是简短地说："我们不能冒发生冲突的危险。"

在芝加哥，我只剩12分钟时间，必须从卡纳尔联盟车站赶到尼科尔普雷特车站。拖着行李，我无目标地匆匆来回，问了两个人都没给我回答。一位年轻的女士注意到了我的忙乱，带着迷人的微笑，问我有什么事。她也不能为我指点迷津，或许她根本就没听懂我的问题，但她指示我去找旁边的一位警察，而处于焦虑之中的我，竟然没有看到他，尽管他是那么魁梧注目。当我发自内心深处、而不是空洞阿谀地称赞她，说"你真是一位天使"时，我注意到她的表

情真像“维罗纳喷泉”上的保护神。为什么对于保护神的信仰只应纯粹是一种幻想呢？芝加哥的卡纳尔联盟车站大厅如何会适宜于仙女传说般的气氛呢？我从这位保护神转向了那位和平的守护神，他很快地给了我必要的指导，使我得以准时赶到另一个车站。

在纽约，我遇到另一件怪事。从火车站通往渡口的美丽的栈桥居然被焚毁了，我只好狼狈地拖着沉重的行李，跌跌绊绊地跨过那些被烧成了黑炭的木料。

尽管遇到了这么多不顺利的事，我还是适时地赶到了恺撒·威廉二世号。当我和我全部的行李终于上了船之后，我的情绪一时间又是那么地高涨！

船儿驶向祖国，
英雄和着快乐的歌声，
愉快地回到家乡。

我们返程正赶上极好的气候。船上供应的精美的食物也使我的胃得到了完全的恢复。我再也没喝一滴水，也没喝多少啤酒，但喝了许多一流的吕德斯海姆酒。这就是船上的最大优势：只要你稍许动心，它就能将你推到极致。

再往下依稀记得的，就是从不来梅到维也纳的不足道的火车旅程，乘坐时髦的维也纳马车，以及我又回到了家中。这么一种旅行，给人以有趣愉快的游历：加利福尼亚的美丽，沙斯塔山的壮观，黄石公园的奇妙，等等，但整个旅程中最可爱的部分，却是回到家中的这一刻。

英译注解

1. 玻尔兹曼犯了一些事实上的错误，例如，贝克莱是爱尔兰人，不是英国人。赫斯特希腊剧院模仿的是在埃皮扎夫罗斯，而不是在雅典的圆形剧场。“伯克利大学”

应当为加利福尼亚大学。

2. 帮助翻译的附加材料在方括号中给出。

3. 圆括号为玻尔兹曼本人最初所用。

4. 加引号的英文表明为玻尔兹曼本人所用英文词。

5. 当原有的德文词/词组无法翻译时，包含于文中。

6. 引文未加翻译。

参 考 文 献

The references are listed according to the chapter in which they are cited. The references quoted in the appendices are listed together with those of the relevant chapter. Several references to the journal Annalen der Physik und Chemie up to 1899 (*from 1900, entitled just* Annalen der Physik) *are given under its informal title* Poggendorff's Annalen (*1824—1877*) *and* Wiedemann's Annalen (*1877—1899*).

第 一 章

[1] I. M. Fasol-Boltzmann, Ed. (1990). *Ludwig Boltzmann: Principien der Naturalfilosofi*. Springer-Verlag, Berlin.

[2] D. Flamm, Ed. (1985). *Hochgeehrter Herr Professor! Innig geliebter Louis! Ludwig Boltz-mann, Henriette von Aigentler, Briefwechsel*. Böhlau Verlag, Vienna.

[3] D. Flamm (1973). Life and personality of Ludwig Boltzmann, in *The Boltzmann equation: theory and application*, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring, pp. 3—16. Springer-Verlag, Vienna.

[4] W. Höflechner (1993). A version of the life of Ludwig Boltzmann, in *Proceedings of the International Symposium on Ludwig Boltzmann*, ed. G. Battimelli, M. G. Ianniello,

and O. Kresten. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna.

[5] W. Höflechner, ed. (1994). *Ludwig Boltzmann: Leben und Briefe*, Publikationen aus dem Archiv der Universität Graz, Band 30. Akademische Druck-und Verlagsanstalt, Graz.

[6] L. Boltzmann (1905). *Populäre Schriften*. Leipzig. [Most of the content of this book, but not all, is available in a English translation under the title *Theoretical physics and philosophical problems*, ed. B. McGuinness, Reidel, Dordrecht. (1974). We shall stick to this translation whenever possible.]

[7] W. Höflechner and A. Honester (1985). *Ludwig Boltzmann, 1844—1906, eine Dokumentation*. Graz.

[8] P. Coveney and R. Highfield (1991). *The arrow of time*. W. H. Allen, New York.

[9] G. H. Bryan (1906). Prof. Ludwig Boltzmann. *Nature*, **74**, 569—570.

[10] Anon. (1906). Der Tod des Hofrates Boltzmann. *Die Zeit* (Vienna), No. 1421, Morgenblatt, 8 Sept., p. 5.

[11] L. Flamm (1944). Die Persönlichkeit Boltzmanns. *Wiener Chemiker Zeitung*, **47**, 30.

[12] A. Höfler (1906). Ludwig Boltzmann als Mensch und als Philosoph. *Süddeutsche Monatshefte*, October 3, unpaginated.

[13] E. Mach (1906). Ludwig Boltzmann. *Die Zeit* (Vienna), no. 1420, Abendblatt, 7 Sept., p. 1.

[14] Anon. (1906). Weitere Nachrichten die letzen Tage. *Die Zeit* (Vienna), no. 1420, Abendblatt, 7 Sept., p. 1.

[15] Private communication from Frau Dr. Lili Hahn, quoted in: J. T. Blackmore (1972). *Ernst Mach: his work, life and influence*. University of California Press, Berkeley.

[16] W. Moore (1989). *Schrödinger: life and thought*. Cambridge University Press.

[17] G. H. von Wright (1955). Ludwig Wittgenstein, a biographical sketch. *Philosophical Review*, **64**, 527—544.

[18] A. Janik and S. Toulmin (1973). *Wittgenstein's Vienna*. Simon and Schuster, New York.

[19] R. M. Rilke (1939). *Duino elegies*. transl. J. B. Leishman and S. Spender. Norton, New York.

[20] A. J. May (1968). *The Habsburg monarchy 1867—1914*. Norton Library, New York.

[21] R. Musil (1953—1960). *The man without qualities*, transl. E. Wilkins and E. Kaiser, 3 vols. Secker and Warburg.

[22] E. Broda (1973). Philosophical biography of Ludwig Boltzmann, in *The Boltzmann e-*

quation: theory and application, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring, pp. 17—52. Springer-Verlag, Vienna.

[23] P. Schick (1965). *Karl Kraus in Selbstzeugnissen und Bilddokumenten*. Rowohlt, Reinbeck bei Hamburg.

[24] L. Boltzmann (1897—1904). *Vorlesungen über die Principe der Mechanik*, 2 vols. Barth, Leipzig.

[25] V. I. Ul'yanov (V. I. Lenin) (1909). *Materialism and empirio-criticism* [in Russian]. Izdanie "Zveno" Moscow.

[26] L. Boltzmann (1974). On the principles of mechanics, in *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[27] H. Schnitzler (1954). Gay Vienna—Myth and Reality. *Journal of the History of Ideas*, **15**, 94—118.

[28] F. Rohrlich (1992) A poem by Ludwig Boltzmann *American Journal of Physics*, **60**, 972—973.

第 二 章

[1] L. Boltzmann (1974). On the development of the methods of theoretical physics in recent times, in *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[2] I. Newton (1704). *Opticks*. London.

[3] R. Boscovich (1763). *Theoria philosophiae naturalis*, Venice. [English translation: *A theory of natural philosophy*, Open Court, Chicago (1922); reprinted by MIT Press, Cambridge, MA (1966)].

[4] M. Born (1964). *Natural philosophy of cause and chance*. Dover, New York.

[5] L. Boltzmann (1895). On certain questions of the kinetic theory of gases. *Nature*, **51**, 413—415.

[6] P. S. de Laplace (1814). *Essai philosophique sur les probabilités*. Paris. [reprinted by Gauthiers-Villars, Paris (1921)].

[7] G. W. Leibniz (1686). Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii et aliorum circa legem naturalem, secundum qua volunt a Deo eandem semper quantitatem motus conservari, qua et in re mechanica abutuntur. *Acta eruditorum* (*Leipzig*) [English translation in: R. B. Lindsay, *Energy, historical development of the concept*, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudberg, PA (1975)].

[8] G. W. Leibniz (1840). *Opera philosophica*, p.775. Erdmann, Berlin.

[9] J. Hutton (1795). *Theory of the Earth*. Edinburgh.

[10] J. R. Mayer (1842). Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. *Liebig's Annalen der Chemie und Pharmazie*, **42**, 239.

[11] J. R. Mayer (1845). *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel. Ein Beitrag zur Naturkunde*. Verlag der C. Drechslerschen Buchhandlung, Heilbronn.

[12] J. R. Mayer (1848). *Beiträge zur Dynamik des Himmels in populärer Darstellung*. Verlag von Johann Ulrich Landherr, Heilbronn.

[13] S. Carnot (1824). *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propre à développer cette puissance*. Bachelier, Paris [English translation by R. H. Thurstion in: S. Carnot, *Reflections on the motive power of fire and other papers on the second law of thermodynamics*, ed. E. Mendoza, Dover, New York (1960)].

[14] É. Clapcyron (1834). Mémoir sur la puissance motrice de la chaleur. *Journal de l'École Polytechnique*, **14**, 153—190 [English translation by E. Mendoza in: S. Carnot, *Reflections on the motive power of fire and other papers on the second law of thermodynamics*, ed. E. Mendoza, Dover, New York (1960)].

[15] M. Klein (1974). Closing the Carnot cycle, in *Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique*. CNRS, Paris.

[16] J. C. Maxwell (1871). *Theory of heat*. Longmans, Green, London.

[17] W. Thomson (Lord Kelvin) (1852). On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy, *Philosophical Magazine*, Ser. 4, **4**, 304.

[18] H. von Helmholtz (1847). *Über die Erhaltung der Kraft*. Berlin.

[19] H. von Helmholtz (1871). Über die Wechselwirkung der Naturkräfte. Ein populärwissenschaftlicher Vortrag, gehalten am 7. Februar 1854 in Könisberg in Preußen, in *Populäre Vorträge*, 2. Heft. Vieweg, Braunschweig.

[20] J. C. Maxwell (1881). *Treatise on electricity and magnetism*, 2nd edn. Clarendon Press, Oxford.

[21] G. Gamow (1961). *Biography of physics*. Harper Torchbooks, New York.

[22] L. Boltzmann (1905). G. Kirchhoff, in *Populäre Schriften*. Barth, Leipzig.

[23] L. Boltzmann (1974). On the indispensability of atomism in natural science, in *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905), ed. B. McGuinness, Reidel, Dordrecht.

[24] L. Euler (1914). *Opera omnia*, vol. XIII, 9. Teubner, Lepzig.

第 三 章

[1] D. Bernoulli (1738). *Hydrodynamica*. Argentorati, Strassburg.

[2] C. Cercignani (1990). *Mathematical methods in kinetic theory*, rev. edn. Plenum Press, New York [1 st edn 1969].

[3] C. Cercignani (1988). *The Boltzmann equation and its applications*. Springer-Verlag, New York.

[4] C. Cercignani, R. Illner, and M. Pulvirenti (1994). *The mathematical theory of dilute gases*. Springer-Verlag, New York.

[5] R. Clausius (1858). Über die mittlere Länge der Wege, welche bei der Molekularbewegung gasförmiger Körper von den einzelnen Molekülen zurückgelegt werden; nebst einigen anderen Bemerkungen über die mechanische Wärmetheorie. *Poggendorff's Annalen*, **105**, 239—258.

[6] J. C. Maxwell (1860). Illustration of the dynamical theory of gases. Part I: On the motions and collisions of perfectly elastic spheres. Part II: On the process of diffusion of two or more kinds of moving particles among one another. Part III: On the collisions of perfectly elastic bodies of any form. *Philosophical Magazine*, Ser. 4, **19**, 48—62, 63—76, 76—80.

[7] J. C. Maxwell (1867). On the dynamical theory of gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **157**, 49—88.

[8] L. Boltzmann (1872). Weitere Studienüber das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie Wissenschaften, Wien*, II, **66**, 275—370.

[9] S. Carnot (1824). *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propre à développer cette puissance*. Bachelier, Paris.

[10] É. Clapeyron (1834). Mémoir sur la puissance motrice de la chaleur. *Jounal de l'École Polytechnique*, **14**, 153—190 [English translation by E. Mendoza in: S. Carnot, *Reflections on the motive power of fire and other papers on the second law of thermodynamics*, ed. E. Mendoza, Dover, New York (1960)].

[11] W. Thomson (Lord Kelvin) (1849). An account of Carnot's theory of the motive power of heat; with numerical results deduced from Regnault's experiments on steam. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **16**, 113—155.

[12] M. Klein (1974). Closing the Carnot cycle, in *Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique*. CNRS, Paris.

[13] W. Thomson (Lord Kelvin) (1852). On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy. *Philosophical Magazine*, Ser. 4, **4**, 304.

[14] H. von Helmholtz (1847). *Über die Erhaltung der Kraft*. Berlin.

[15] R. Clausius (1850). Über die bewegende Kraft der Wärme, und die Gesestze, welche sichdaraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. *Poggendorff's Annalen*, **79**, 368—500 [English translation by W. F. Magie in: S. Carnot, *Reflections on the motive power of fire and other papers on the second law of thermodynamics*, ed. E. Mendoza, Dover, New York (1960)].

[16] R. Clausius (1856). On a modified form of the second fundamental theorem in the mechanical theory of heat. *Philosophical Magazine*, **12**, 86.

[17] R. Clausius (1865). Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. *Poggendorff's Annalen*, **125**, 353.

[18] C. G. Knott (1911). *Life and scientific work of Peter Guthrie Tait*. Cambridge University Press, London.

[19] J. C. Maxwell (1871). *Theory of heat*, Chapter XXII. Longmans, London.

[20] M. Klein (1970). Maxwell, his demon, and the second law of thermodynamics. *American Scientist*, **58**, 84—97.

[21] P. G. Tait(1879—80). Clerk-Maxwell's scientific work. *Nature*, **21**, 321.

[22] W. J. M. Rankine (1865). On the second law of the thermodynamics. *Philosophical Magazine*, Ser. 4, **30**, 241—245.

[23] W. J. M. Rankine(1867). Sur la nécessité de vulgariser la seconde loi de la thermodynamique. *Annales de Chimie et de Physique*, Ser. 4, **12**, 258—266.

[24] L. Boltzmann (1870). Theorie der Wärme. *Fortschritte der Physik*, **26**, 441—504.

[25] L. Boltzmann (1866). Über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie. *Wiener Berichte*, **53**, 195—220.

[26] R. Clausius (1871). Über Zurückführung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie auf allgemeine mechanische Prinzipien. *Poggendorff's Annalen*, **142**, 433—461.

[27] L. Boltzmann (1871). Zur Priorität der Auffindung der Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und dem Prinzip der kleinsten Wirkung. *Poggendorff's Annalen*, **143**, 211—230.

[28] R. Clausius (1871). Bemerkungen zu der Prioritätsreclamation des Hrn. Boltzmann. *Poggendorff's Annalen*, **144**, 265—280.

[29] J. W. Gibbs (1889). Rudolf Julius Emmanuel Clausius. *Proceedings of the American Academy*, **16**, 458—465.

[30] A. Einstein (1904). Allgemeine molekulare Theorie der Wärme. *Annalen der Physik*, **14**, 354—362.

第 四 章

[1] L. Boltzmann (1872). Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien, II, **66**, 275 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 88—175, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[2] J. C. Maxwell (1867). On the dynamical theory of gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **157**, 49—88.

[3] L. Boltzmann (1868). Studien über das Gleichgewicht der lebendingen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **58**, 517.

[4] L. Boltzmann (1871). Über das Wärmegleichgewicht zwischen mehratomigen Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **63**, 397.

[5] L. Boltzmann (1871). Einige allgemeine Sätze über Wärmegleichgewicht. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **63**, 679.

[6] M. J. Klein (1973). The development of Boltzmann's statistical ideas, in *The Boltzmann equation: theory and applications*, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring. Springer-Verlag, Vienna.

[7] P. and T. Ehrenfest (1911). Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik. in *Enzyklopädie der mathematischen wissenschaften*, Vol. IV, Part 32. Leipzig.

[8] L. Boltzmann (1871). Analytischer Beweis des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie aus den Sätzen über das Gleichgewicht der lebendingen Kraft. *Sitzungs-berichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **63**, 712.

[9] M. Planck (1948). *Wissenschaftliche Selbstbiographie*. Leipzig.

[10] C. Cercignani (1988). *The Boltzmann equation and its applications*. Springer-Verlag, New York.

[11] C. Cercignani, R. Illner, and M. Pulvirenti (1994). *The mathematical theory of dilute gases*. Springer-Verlag, New York.

[12] R. K. Alexander (1975). The infinite hard sphere system. Ph D thesis, University of California at Berkeley.

[13] C. Cercignani (1972). On the Boltzmann equation for rigid spheres. *Transport Theory and Statistical Physics*, **2**, 211.

[14] H. Spohn (1984). Boltzmann hierarchy and Boltzmann equation, in *Kinetic theories and the Boltzmann equation*, ed. C. Cercignani, LNM 1048. Springer-Ver-

lag, Berlin.

[15] D. Enskog (1922). Kinetische Theorie der Wärmeleitung, Reibung und Selbstdiffusion in gewissen verdichteten Gasen und Flüssigkeiten. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, **63**, 3—44.

第 五 章

[1] L. Boltzmann (1872). Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, II, **66**, 275—370 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2. *Irreversible processes*, pp. 88—175, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[2] T. Carleman (1933). Sur la théorie de l'équation intégro-differentielle de Boltzmann. *Acta Mathematica*, **60**, 91.

[3] T. Carleman 1957. *Problèmes mathématiques dans la théorie cinétique des gaz*. Almqvist & Wiksell, Uppsala.

[4] H. A. Lorentz (1887). Über das Gleichgewicht der lebendingen Kraft unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **95**, 115—152.

[5] L. Boltzmann (1877). Neuer Beweis zweier Sätze über das Wärmegleichgewicht unter mehratomigen Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **95**, 153—164.

[6] L. Boltzmann (1895—8). *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vols. Barth, Leipzig [English translation: *Lectures on gas theory*, transl. S. G. Brush, University of California Press (1964)].

[7] R. C. Tolman (1938). *The principles of statistical mechanics*. Oxford.

[8] E. C. G. Stueckelberg (1952). Théorème *H* et unitarité de *S*. *Helvetica Physica Acta*, **25**, 577—580.

[9] L. Waldmann (1958). Transporterscheinungen in Gasen von mittlerem Druck, in *Handbuch der Physik*, ed. S. Flügge, Vol. XII. Springer-Verlag.

[10] C. Cercignani and M. Lampis (1981). On the *H*-theorem for polyatomic gases. *Journal of Statistical Physics*, **26**, 795.

[11] A. Kox (1990). H. A. Lorentz contributions to kinetic gas theory. *Annals of Science*, **47**, 591—606.

[12] P. Hein (1966). *Grooks*. MIT Press.

[13] W. Thomson (Lord Kelvin) (1874). The kinetic theory of the dissipation of energy. *Proceeding of the Royal Society of Edinburgh*, **8**, 325—334.

[14] J. Loschmidt (1876). Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von

Körpern mit Rucksicht auf die Schwerkraft. *Wiener Berichte*, **73**, 139.

[15] L. Boltzmann (1877). Über die Beziehung eines allgemeine mechanischen Satzes zum zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*, *Wien*, II, **75**, 67—73 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 188—193, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[16] F. Nietzsche (1926). *Der Wille zur Macht*, in *Gesammelte Werke*, Vol. 19, Book 4, Part 3. Musarion Verlag, Munich.

[17] H. Poincaré (1893). Le mécanisme et l'expérience. *Revue de Metaphysique et de Morale*, **4**, 534 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 203—207, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[18] H. Poincaré (1890). Sur les problème des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Mathematica*, **13**, 1—270 [Extracts translated into English in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 194—202, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[19] E. Zermelo (1886). Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie. *Wiedemann's Annalen*, **57**, 485—494 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 208—217, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[20] L. Boltzmann (1896). Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo. *Wiedemann's Annalen*, **57**, 773—784 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 218—228, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[21] E. Zermelo (1896). Über mechanische Erklarungen irreversibler Vorgange. *Wiedemann's Annalen*, **59**, 793—801 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 229—237, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[22] L. Boltzmann (1897). Zu Hrn. Zermelo Abhandlung über die mechanische Erklarungen irreversibler Vorgange. *Wiedemann's Annalen*, **60**, 392—398 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 238—245, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[23] H. Grad (1949). On the kinetic theory of rarified gases. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **2**, 325.

[24] H. Grad (1958). Principles of the kinetic theory of gases, in *Handbuch der Physik*, ed. S. Flügge, Vol. XII, Springer-Verlag.

[25] H. Grad (1961). The many faces of entropy. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **14**, 323.

[26] E. L. Hahn (1950). Spin echose. *Physical Review*, **80**, 580.

[27] B. J. Alder and T. E. Wainwright (1960). Studies in molecular dynamics Ⅱ Behavior of a small number of elastic spheres. *Journal of Chemical Physics*, **33**, 1439.

[28] A. Bellemans and J. Orban (1967). Velocity inversion and irreversibility in a dilute gas of hard disks. *Physics Letters*, **24A**, 620.

[29] D. Levesque and L. Verlet (1993). Molecular dynamics and time reversibility. *Journal of Statistical Physics*, **72**, 519—537.

[30] C. Cercignani (1972). On the Boltzmann equation for rigid spheres. *Transport Theory and Statistical Physics*, **2**, 211.

[31] O. E. Lanford Ⅲ (1975). Time evolution of large classical systems, in *Dynamical systems, theory and applications*, ed J. Moser, LNP 38, 1. Springer-Verlag, Berlin.

[32] D. Morgenstern (1954). General existence and uniqueness proof for spatially homogeneous solutions of the Maxwell-Boltzmann equation in the case of Maxwellian molecules. *Proceedings of the National Academy of Sciences (U. S. A.)*, **40**, 719—721.

[33] L. Arkeryd (1972). On the Boltzmann equation. Part I: Existence. *Archives for Rational Mechanical Analysis*, **45**, 1—16.

[34] T. Nishida and K. Imai (1977). Global solutions to the initial value problem for the nonlinear Boltzmann equation. *Publications of the Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University*, **12**, 229—239.

[35] Y. Shizuta and K. Asano (1974). Global solutions of the Boltzmann equation in a bounded convex domain. *Proceedings of the Japan Academy*, **53**, 3—5.

[36] S. Ukai (1974). On the existence of global solutions of mixed problem for non-linear Boltzmann equation. *Proceedings of the Japan Academy*, **50**, 179—184.

[37] C. Cercignani 1977. *The Boltzmann equation and its applications*. Springer-Verlag, New York.

[38] C. Cercignani, R. Illner, and M. Pulvirenti (1944). *The mathematical theory of dilute gases*. Springer-Verlag, New York.

[39] R. Illner and M. Shinbrot (1984). The Boltzmann equation: global existence for a rare gas in an infinite vacuum. *Communications in Mathematical Physics*, **95**, 217—226.

[40] R. Illner and M. Pulvirenti (1986). Global validity of the Boltzmann equation for two dimensional rare gas in a vacuum. *Communications in Mathematical Physics*,

105, 189—203.

[41] R. Illner and M. Pulvirenti (1989). Global validity of the Boltzmann equation for two-and three-dimensional rare gas in vacuum: erratum and improved result. *Communications in Mathematical Physics*, **121**, 143—146.

[42] R. DiPerna and P.-L. Lions (1989). On the Cauchy problem for Boltzmann equations. *Annals of Mathematics*, **130**, 321—366.

[43] L. Boltzmann (1974). On the development of the methods of theoretical physics in recent times, in *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[44] R. Penrose (1989). *The emperor's new mind*. Oxford University Press.

[45] A. Eddington 1959. *New pathways in science*. University of Michigan Press, Ann Arbor.

[46] D. W. Sciama (1971). *Modern cosmology*. Cambridge University Press, London.

[47] T. Gold (1962). The arrow of time, in *Recent developments in general relativity*, pp. 225—234. Pergamon Press, New York.

[48] J. W. Cronin (1981). CP symmetry violation—the search for its origin. *Reviews of Modern physics*, **53**, 373.

[49] C. Cercignani (1989). Le radici fisichee matematiche dell'irreversibilità temporale [with translation into English]. *Alma Mater Studiorum*, **2**, 37—52.

[50] R. Illner and H. Neunzert (1987). The concept of irreversibility in the kinetic theory of gases. *Transport Theory and Statistical Physics*, **16**, (1), 89—112.

[51] M. Ageno (1992). *Le origini della irreversibilità*. Bollati Boringhieri, Turin.

[52] K. Gödel (1949). Aremark about the relationship between relativity theory and idealistic philosophy, in *Albert Einstein, philosopher-scientist*, ed. P. A. Schilpp, pp. 557—562. Open Court, La Salle, IL.

[53] H. Reichenbach (1956). *The direction of time*. University of California Press, Berkeley.

[54] J. L. Mackie (1974). *Causation: the cement of the universe*. Oxford University Press.

[55] J. Earman (1974). An attempt to add a little direction to 'The problem of the direction of time'. *Philosophy of Science*, **41**, 15—47.

[56] G. H. von Wright (1971). *Explanation and understanding*. Cornell University Press, Ithaca, NY.

[57] W. C. Salmon (1984). *Scientific explanation and the causal structure of the world*. Princeton University Press.

[58] P. Horwich (1987). *Asymmetries in time. Problems in the philosophy of science*.

MIT Press, Cambridge, MA.

[59] I. Prigogine and I. Stengers (1979). *La nouvelle alliance. Metamorphoses de la science*. Gallimard, Paris.

[60] I. Prigogine and I. Stengers (1988). *Entre le temps et l'éternité*. Fayard, Paris.

[61] H. Bergson (1907). *L'evolution créatrice*. F. Alcan, Paris.

[62] W. Heisenberg (1958). *The physicist's conception of nature*. Hutchinson, London.

[63] M. Born (1949). *Natural philosophy of cause and chance*. Clarendon Press, Oxford.

[64] K. Popper (1956). *The open universe. An argument for indeterminism*. Rowman & Littlefield, Totowa, NJ.

[65] K. Popper (1956). *Quantum theory and the schism in physics*. Rowman & Littlefield, Totowa, NJ.

[66] K. Popper (1974). *Intellectual autobiography*, in *The philosophy of Karl Popper*, ed. P. A. Schilpp, Book I, pp. 3—181. Open Court, La Salle, IL.

[67] K. Popper (1958). Irreversibility; or, entropy since 1905. *British Journal for the Philosophy of Science*, **8**, 151—163.

[68] J. C. Maxwell (1878). Tait's 'Thermodynamics'. *Nature*, **17**, 257—259, 278—280.

[69] P. K. Feyerabend (1975). *Against the method*. New Left Books, London.

[70] J. Bricmont (1995). Science of chaos or chaos in science?. *Physicalia Magazine*, **17**, 159—208.

[71] I. Prigogine (1995). Science of chaos or chaos in science: a rearguard battle. *Physicalia Magazine*, **17**, 213—218.

[72] J. Bricmont (1995). The last word from the rearguard. *Physicalia Magazine*, **17**, 219—221.

[73] J. L. Lebowitz (1993). Boltzmann's entropy and time's arrow. *Physics Today*, **46**, (9), 32—38.

[74] H. Price (1996). *Time's arrow and Archimedes' point*. Oxford University Press, New York.

[75] P. Coveney and R. Highfield (1990). *The arrow of time—a voyage through science to solve time's greatest mystery*. W. H. Allen, London.

[76] C. Cercignani (1990). *Mathematical methods in kinetic theory*, 2nd edn. Plenum Press, New York [1st edn 1969].

[77] L. Boltzmann (1875). Über das Wärmegleichgewicht von Gasen, auf welche äussere Kräfte wirken. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **72**, 427—457.

[78] L. Boltzmann (1876). Über die Aufstellung und Integration der Gleichungen,

welche die Molekularbewegungen in Gasen bestimmen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*, *Wien*, **74**, 503—552.

[79] T. H. Gronwall (1915). A functional equation in the kinetic theory of gases. *Annals of Mathematics* (2), **17**, 1—4.

[80] T. H. Gronwall (1916). Sur une équation fonctionelle dans la théorie cinétique des gaz. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (*Paris*), **162**, 415—418.

[81] C. Truesdell and R. G. Muncaster (1980). *Fundamentals of Maxwell's kinetic theory of a simple monatomic gas*. Academic Press, New York.

[82] C. Cercignani (1990). Are there more than five linearly independent collision invariants for the Boltzmann equation?. *Journal of Statistical Physics*, **58**, 817—823.

[83] L. Arkeryd (1972). On the Boltzmann equation. Part Ⅱ: The full initial value problem. *Archives for Rational Mechanical Analysis*, **45**, 17—34.

[84] L. Arkeryd and C. Cercignani (1990). On a functional equation arising in the kinetic theory of gases. *Rendiconti Matematiche*, *Accademia dei Lincei*, s. 9, **1**, 139—49.

[85] B. Wennberg (1992). On an entropy dissipation inequality for the Boltzmann equation. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (*Paris*), I, **315**, 1441—1446.

[86] B. Touscheck and G. Rossi (1970). *Meccanica statistica*. Boringhieri, Turin.

第 六 章

[1] L. Boltzmann (1872). Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*, *Wien*, Ⅱ, **66**, 275—370 [English translation in: S. G. Brush. *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 88—175, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[2] M. J. Klein (1973). The development of Boltzmann's statistical ideas. in *The Boltzmann equation: theory and applications*, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring. Springer-Verlag, Vienna.

[3] L. Boltzmann (1877). Über die Beziehung eines allgemeine mechanischen Satzes zum zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*, *Wien*, Ⅱ, **75**, 67—73 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 188—202, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[4] L. Boltzmann (1871). Zur Priorität der Auffindung der Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und dem Prinzip der kleinsten Wirkung. *Poggendorff's Annalen*, **143**, 211—230.

[5] C. G. Knott (1911). *Life and scientific work of Peter Guthrie Tait*. Cambridge

University Press, London.

[6] J.C. Maxwell (1871). *Theory of heat*, Chapter XXII. Longmans, London.

[7] J.C. Maxwell to J.W. Strutt, 6 December 1870. [Reprinted in R.J. Strutt, *Life of John William Strutt, Third Baron Rayleigh*, p. 47, Madison (1856)].

[8] L. Boltzmann (1877). Überdie Beziehung zwischen demzweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. *Wiener Berichte*, **76**, 373—435.

[9] W. Ebeling (1993). Entropy and information in processes of self-organization: uncertainty and unpredictability. *Physica A*, **194**, 563—575.

[10] A. Einstein (1904). Allgemeine molekulare Theorie der Wärme. *Annalen der Physik*, **14**, 354—362.

[11] A. Einstein (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, **17**, 132—148.

[12] A. Einstein (1909). Zur gegenwärtigen Stand der Strahlungsproblems. *Physikalische Zeitschrift*, **10** 185—193.

[13] A. Einstein (1910). Theorie der Opaleszenz von homogenen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen in der Nähe des kritischen Zustand. *Annalen der Physik*, **33**, 1275—1298.

[14] A. Einstein (1903). Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. *Annalen der Physik*, **11**, 170—187.

[15] L. Boltzmann (1895—1898). *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vols. Barth, Leipzig [English translation: *Lectures on gas theory*, transl. by S.G. Brush, University of California Press (1964)].

[16] A. Einstein (1911). Bemerkungen zu den P. Hertzschen Arbeiten: Mechanische Grundlagen der Thermodynamik. *Annalen der Physik*, **34**, 175—176.

[17] A. Einstein (1915). Theoretische Atomistik, in *Kultur der Gegenwart: Die Physik*, ed. E. Lecher, pp. 251—263. Teubner, Leipzig.

[18] E.P. Culverwell (1890). Note on Boltzmann's kinetic theory of gases, and on Sir W. Thom-son's address to Section A, British Association, 1884, *Philosophical Magazine*, **30**, 95.

[19] E. P. Culverwell (1894). Dr. Watson's proof of Boltzmann's theorem on permanence of distributions. *Nature*, **50**, 617.

[20] S.H. Burbury (1894). Boltzmann's minimum function. *Nature*, **51**, 78.

[21] L. Boltzmann (1895). On certain questions of the theory of gases. *Nature*, **51**, 413—415.

[22] L. Boltzmann (1974). The Second Law of thermodynamics, in *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)]. Reidel, Dordrecht.

[23] L. Boltzmann (1898). Über die sogenannte *H*-curve. *Mathematische Annalen*, **50**, 325—332.

[24] P. Ehrenfest and T. Ehrenfest (1911). Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik, in *Enzyklopädie der mathematischen wissenschaften*, Vol. IV, Part 32. Leipzig [English translation: P. Ehrenfest and T. Ehrenfest, *The conceptual foundations of the statistical approach to mechanics*, Dover, New York (1990)].

[25] M. Kaç (1959). *Probability and related topics in physical sciences*. Interscience, London.

[26] L. Boltzmann (1897). Zu Hrn. Zermelo Abhandlung über die mechanische Erklärungen irreversibler Vorgange. *Wiedemann's Annalen*, **60**, 392—8 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 238—245, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[27] C. Cercignani (1988). *The Boltzmann equation and its applications*. Springer-Verlag, New York.

[28] E. Artin (1964). *The gamma function*. Holt, Rinehart and Winston, New York.

第 七 章

[1] L. Boltzmann (1884). Über die Mogncheken der Begründung einer kinetischen Gastheorie auf anziehende Kräfte allein. *Wiener Berichte*, **89**, 714.

[2] J. W. Gibbs (1902). *Elementary principles in statistical mechanics, developed with special reference to the rational foundations of thermodynamics*. Yale University Press.

[3] M. J. Klein (1973). The development of Boltzmann's statistical ideas, in *The Boltzmann equation: theory and application*, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring, pp. 53—106. Springer-Verlag, Vienna.

[4] M. J. Klein (1983). The scientific style of Josiah Willard Gibbs, in *Springs of scientific creativity: essays on founders of modern science*, ed. R. Aris, H. T. Davis and R. H. Stuewer, pp. 142—162. University of Minnesota Press. Minneapolis.

[5] M. J. Klein (1990). The physics of J. Willard Gibbs in his time, in *Proceedings of the Gibbs Symposium*, pp. 1—21. American Mathematical Society, Providence, NJ.

[6] J. W. Gibbs (1906). Graphical methods in the thermodynamics of fluids, in *The*

scientific papers of J. Willard Gibbs, ed. H. A. Bumstead and R. G. Van Name, Vol. I, pp. 1—32. Longmans, Green, New York.

[7] T. Andrews (1869). On the continuity of the gaseous and liquid states of matter. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **159**, 575—590.

[8] J. C. Maxwell (1871). *Theory of heat*. Longmans, Green, London.

[9] J. W. Gibbs (1906). A method of geometrical representation of the thermodynamic properties of substances by means of surfaces, in *The scientific papers of J. Willard Gibbs*, ed. H. A. Bumstead and R. G. Van Name, Vol, I, pp. 33—54. Longmans, Green, New York.

[10] J. Thomson (1871). Considerations on the abrupt changes of boiling or condensing in reference to the continuity of the fluid state of matter. Proceedings of the Royal Society, **20**, 1—8.

[11] J. D. van der Waals (1873). *Over de continuiteit van den gas en vloeistoftoestand*. A. W. Sijthoff, Leiden.

[12] L. P. Wheeler (1952). *Josiah Willard Gibbs. The history of a great mind*, 2nd edn. Yale University Press, New Haven, CT.

[13] J. C. Maxwell (1875). *Theory of heat*, 4th edn. Longmans, Green, London.

[14] J. C. Maxwell (1875). On the dynamical evidence of the molecular constitution of bodies. *Nature*, **11**, 357—359, 374—377.

[15] J. W. Gibbs (1906). On the equilibrium of heterogeneous substances, in *The scientific papers of J. Willard Gibbs*, ed. H. A. Bumstead and R. G. Van Name, Vol. I, pp. 55—353. Longmans, Green, New York.

[16] J. W. Gibbs (1906). Abstract of the equilibrium of heterogeneous substances in *The scientific papers of J. Willard Gibbs*, ed. H. A. Bumstead and R. G. Van Name, Vol. I, pp. 354—371. Longmans, Green, New York.

[17] P. Duhem (1908). *Josiah Willard Gibbs à propos de la publication de ses mémoires scientifiques*. A. Hermann, Paris.

[18] E. B. Wilson (1931). Josiah Willard Gibbs, in *Dictionary of American Biography*, Vol. VII, pp. 248—251.

[19] J. W. Gibbs (1906). List of titles. In *The scientific papers of J. Willard Gibbs*, ed. H. A. Bumstead and R. G. Van Name, Vol. I, pp. 418—434. Longmans, Green, New York.

[20] G. Helm (1898). *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*. Veit, Leipzig.

[21] H. A. Bumstead (1906). Josiah Willard Gibbs. In *The scientific papers of J. Wil-*

lard Gibbs, vol. I, pp. Ⅻ-XXVⅡ. Longmans, Green, New York.

[22] J.C. Maxwell to P.G. Tait, August 1873 [Quoted in a footnote, p.114, of: C.G. Knott, *Life and scientific work of Peter Guthrie Tait*, Cambridge (1911)].

[23] G. Gallavotti (1995). Ergodicity, ensembles, irreversibility in Boltzmann and beyond. *Journal of Statistical Physics*, **78**, 1571—1590.

[24] P. Ehrenfest and T. Ehrenfest (1911). Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik, in *Enzyklopädie der mathematischen wissenschaften*, Vol. IV, Part 32. Leipzig [English translation: P. Ehrenfest and T. Ehrenfest, *The conceptual foundations of the statistical approach to mechanics*, Dover, New York (1990)].

[25] C. Seelig (1960). *Albert Einstein*, p. 176. Europa Verlag, Zurich.

[26] N. Bohr (1972). *Collected works*, Vol. 6, p. 320. North-Holland, Amsterdam.

[27] L. Boltzmann (1895—8). *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vols. Barth, Leipzig.

[28] J. Hadamard (1906). La mécanique statistique. *Bulletin of the American Mathematical Society*, **12**, 194—210.

[29] H. Poincaré (1906). Allocution de la séance publique annuelle du 17 décembre 1906. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **143**, 997.

[30] H. Poincaré (1906). Réflexions sur la théorie cinétique des gaz. *Journal de Physique*, Ser. 4, **5**, 369—403.

[31] S. Brush (1976). *The kind of motion we call heat*. Elsevier, Amsterdam.

[32] J.H. Jeans (1902). On the conditions necessary for equipartition of energy. *Philosophical Magazine*, Ser. 6. **4**, 585—596.

[33] L. Boltzmann (1884). Über die Eigenschaften monocyclischer und anderer damit verwandter Systeme. *Wiener Berichte*, **90**, 231.

[34] J.C. Maxwell (1879). On Boltzmann's theorem on the average distribution of energy in a system of material points. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, **12**, 547.

[35] E. Borel (1915). In *Encyclopédie des Sciences Mathématiques*, Vol. 4, (1.1), p. 188.

[36] G. Birkhoff (1939). The mean ergodic theorem. *Duke Mathematical Journal*, **5**, 635—646.

[37] J. von Neumann (1932). Zur Operatorenmethode in der klassischen Mechanik. *Annals of Mathematics*, **33**, 587—648.

[38] M. Planck (1926). *Treatise on thermodynamics*. Dover, New York.

[39] M. Planck (1904). Über die mechanische Bedeutung der Temperatur und der Entropie, in *Festschrift Ludwig Boltzmann*, pp. 113—122. Barth, Leipzig.

第 八 章

[1] L. Boltzmann (1974). On the development of the methods of theoretical physics in recent times, in *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[2] L. Boltzmann (1876). Über die Aufstellung und Integration der Gleichungen, welche die Molecularbewegung in Gasen bestimmen. *Wiener Berichte*, **74**, 553—560.

[3] L. Boltzmann (1872). Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, II, **66**, 275—370.

[4] H. A. Lorentz (1887). Über das Gleichgewicht der lebendingen Kraft unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **95**, 115—152.

[5] L. Boltzmann (1887). Neuer Beweis zweier Sätze über das Wärmegleichgewicht unter mehratomigen Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **95**, 153—164.

[6] L. Boltzmann (1895—8). *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vols. Barth, Leipzig [English translation: *Lectures on gas theory*, transl. by S. G. Brush, University of California Press (1964)].

[7] R. C. Tolman (1938). *The principles of statistical mechanics*. Oxford.

[8] G. E. Uhlenbeck (1973). The validity and the limitations of the Boltzmann equation, in *The Boltzmann equation: theory and application*, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring, pp. 107—119. Springer-Verlag, Vienna.

[9] L. Waldmann (1973). On kinetic equations for particles with internal degrees of freedom, in *The Boltzmann equation: theory and application*, pp. 223—246, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring. Springer-Verlag, Vienna.

[10] E. C. G. Stueckelberg (1952). Théorème *H* et unitarité de *S*. *Helvetica Physica Acta*, **25**, 577—580.

[11] L. Waldmann (1958). Transporterscheinungen in Gasen von mittlerem Druck, in *Handbuch der Physik*, ed. S. Flügge, Vol. XII. Springer-Verlag.

[12] C. Cercignani and M. Lampis (1981). On the *H*-theorem for polyatomic gases. *Journal of Statistical Physics*, **26**, 795.

[13] A. Kox (1990). H. A. Lorentz contributions to kinetic gas theory. *Annals of Science*, **47**, 591—606.

[14] L. Galgani (1993). Boltzmann and the problem of equipartition of energy, in *Proceedings of the International Symposium on Ludwig Boltzmann*, ed. G. Battimelli,

M. G. Ianniellom, and O. Kresten, pp. 193—202. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna.

[15] L. Boltzmann (1895). On certain questions of the theory of gases. *Nature*, **51**, 413—415.

[16] J. H. Jeans (1905). A comparison between two theories of radiation. *Nature*, **72**, 293.

[17] J. H. Jeans (1905). On the partition of energy between matter and ether. *Philosophical Magazing*, **10**, 91.

[18] J. H. Jeans (1903). On the vibrations set up in molecules by collisions. *Philosophica Magazine*, **6**, 279.

[19] L. Landau and E. Teller (1965). On the theory of sound dispersion. In *Collected papers of L. D. Landau*, ed. D. ter Haar, p. 147. Pergamon Press, Oxford [from *Physikalische Zeitschrift der Sowietunion*, **10**, 34 (1936)].

[20] N. N. Nekhoroshev (1977). Exponential estimate of the stability time of near-integrable Hamiltonian systems. *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, **32**, 1.

[21] N. N. Nekhoroshev (1979). Exponential estimate of the stability time of near-integrable Hamiltonian systems. *Trudy Sem. Petrowski*, **5**, 5.

[22] G. Benettin, L. Galgani, and A. Giorgilli (1985). A proof of Nekhoroshev's theorem for the stability time of near-integrable Hamiltonian systems. *Celestial Mechanics*, **37**, 1—25.

[23] G. Benettin, L. Galgani, and A. Giorgilli (1984). Boltzmann's ultraviolet cutoff and Nekhoroshev's theorem on Arnold diffusion. *Nature*, **311**, 444—445.

[24] G. Benettin and G. Gallavotti (1986). Stability of motions near resonances in quasi-integrable Hamiltonian systems. *Journal of Statistical Physics*, **44**, 293—338.

[25] G. Benettin, L. Galgani, and A. Giorgilli (1987). Exponential law for the equipartition times among translational and vibrational degrees of freedom. *Physics Letters A*, **120**, 23—27.

[26] A. N. Kolmogorov (1954). On the conservation of quasi-periodic motions for a small change in the Hamiltonian function. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, **98**, 527—30 [English translation in: G. Casati and G. Ford (Eds), *Lecture Notes on Physics*, No. 93. Springer-Verlag, Berlin (1979)].

[27] E. Fermi, J. Pasta, and S. Ulam (1955). Studies of non linear problems. *Los Alamos Reports*, no. LA-1940.

[28] V. I. Arnold (1978). *Mathematical methods of classical mechanics* [translated from Russian]. Springer-Verlag, New York.

[29] V. I. Arnol'd (1963). Small denominators and problems of stability of motion in classical and celestial mechanics. *Russian Mathematical Surveys*, **18**, 85—193.

[30] J. E. Moser (1962). On invariant curves of area-preserving mappings of an annulus. *Nachrichten Akademie der Wissenschaft Göttingen*, No. 1.

[31] G. Benettin, L. Galgani, and A. Giorgilli (1987). Realization of holonomic constraints and freezing of high frequency degrees of freedom in the light of classical perturbation theory. Part Ⅰ. *Communications in Mathematics Physics*, **113**, 87—103.

[32] G. Benettin, L. Galgani, and A. Giorgilli (1989). Realization of holonomic constraints and freezing of high frequency degrees of freedom in the light of classical perturbation theory. Part Ⅱ. *Communications in Mathematics Physics*, **121**, 557—601.

[33] H. Poincaré (1957). *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*. Dover, New York.

[34] G. Birkhoff (1927). *Dynamical systems*. New York.

[35] G. Gallavotti (1976). Quasi-integrable mechanical systems, in *Critical phenomena*, *random systems*, *gauge theories*, ed. K. Osterwalder and R. Stora. North-Holland, Amsterdam.

第 九 章

[1] L. Boltzmann (1865). Über die Bewegung der Elektrizität in kummen Flächen. *Wiener Berichte*, **52**, 214—221.

[2] L. Boltzmann (1874). Über die Verschiedenheit der Dielectricität-sconstante des kristallisirten Schwefels nach verschiedenen Richtungen. *Wiener Sitzberichte*, 8 Oct.

[3] L. Boltzmann (1874). Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. *Wiener Berichte*, **70**, 275—306.

[4] W. Weber (1835). Über die Elasticität der Seidenfäden. *Poggendorf's Annalen*, **34**, 247—257.

[5] F. Kohlrausch (1864). Über die elastische Nachwirkung bei der Torsion. *Poggendorf's Annalen*, **119**, 337—368.

[6] F. Kohlrausch (1866). Beiträge zur Kenntniss der elastischen Nachwirkung. *Poggendorf's Annalen*, **128**, 1—20, 207—27, 399—419.

[7] O. E. Meyer (1874). Theorie de elastischen Nachwirkung. *Poggendorf's Annalen*, **151**, 108—119.

[8] E. Picard (1907). La mécanique classique et ses approximations successives. *Scien-*

tia, **1**, 4—15.

[9] V. Volterra (1909). Sulle equazioni integro-differenziali della teoria dell'elasticità. *Rendi-conti Academie dei Lincei*, Ser. 5^a, **18**, 295—301.

[10] V. Volterra (1909). Equazioni integro-differenziali della elasticità nel caso della isotropia, *Rendiconti Academia dei Lincei*, Ser. 5^a, **18**, 577—586.

[11] M. G. Ianniello and G. Israel (1993). Boltzmann's "Nachwirkung" and hereditary mechanics, in *Proceedings of the International Symposium on Ludwig Boltzmann*, ed. G. Battimelli *et al.*, pp. 113—133, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna.

[12] H. Markovitz (1977). Boltzmann and the beginnings of linear viscoelasticity. *Transactions of the Society of Rheology*, **21**, 381—398.

[13] L. Boltzmann (1890). Über die Hertz'schen Versuche. *Wiedemann's Annalen*, **40**, 399—400.

[14] L. Boltzmann (1890—3). *Vorlesungen uber Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes*, 2 vols. Barth, Leipzig.

[15] L. Boltzmann (1897). Über irreversible Strahlungsvorgänge. I. *Berliner Berichte* [*Berichteder Deutschen Chemischen Gesellschaft*], 660—662.

[16] J. Stefan (1879). Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Wiener Berichte*, **79**, 391—428.

[17] L. Boltzmann (1884). Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Wiede-mann's Annalen*, **22**, 291—294.

[18] H. A. Lorentz (1907). Ludwig Boltzmann. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, **9**, 206—238.

[19] M. Planck (1931). *J. C. Maxwell*. Macmillan, New York.

[20] W. Wien (1893). Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Haupsatz der Wärmetheorie. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*. Berlin, 9 Feb., p. 55.

[21] L. Boltzmann (1974). More on atomism, in *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[22] L. Boltzmann (1868). Über die Integrale linearer Differentialgleichungen mit periodischen Koeffizienten. *Wiener Berichte*, **58**, 54—59.

[23] I. M. Fasol-Boltzmann (Ed). (1990). *Ludwig Boltzmann: Principien der Naturalfilosofi*. Springer-Verlag, Berlin.

[24] H. Hertz (1894). *Die Prinzipien der Mechanik in neuen Zusammenhange dargestellt*. Barth, Leipzig.

[25] L. Boltzmann (1897—1904). *Vorlesungen über die Principe der Mechanik*, 2 vols. Barth, Leipzig.

[26] L. Boltzmann (1974). *Theoretical physics and philosophical problems*, ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[27] H. Motz (1982). Did the germ of general relativity come from Boltzmann, in *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe: 8. Ausgewählte Abhandlungen der Internationalen Tagung Wien 1881*, ed. R. Sexl and J. Blackmore, pp. 355—361. Akademische Druck-und Verlagsanstalt, Graz.

[28] S. Wagner (1982). Ludwig Boltzmann and the special theory of relativity, in *Ludwig Boltzmann Gesammtausgabe: 8. Ausgewählte Abhandlungen der Internationalen Tagung Wien 1881*, ed. R. Sexl and J. Blackmore, pp. 341—354. Akademische Druck-und Verlagsanstalt, Graz.

[29] A. Einstein (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, **17**, 891—921 [English translation in: H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, and H. Weyl *The principle of relativity*, Methuen, London (1923)].

[30] P. Frank (1979). *Einstein, sein Leben und seine Zeit*. Vieweg, Braunschweig [English translation: P. Frank, *Einstein, his life and time*, transl. G. Rosen, Knopf, New York (1953)].

第 十 章

[1] L. Boltzmann (1905). *Populäre Schriften*. Barth, Leipzig.

[2] L. Boltzmann (1974). *Theoretical physics and philosophical problems* [partial English translation of *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[3] I. M. Fasol-Boltzmann (Ed.) (1990). *Ludwig Boltzmann: Principien der Naturalfilosofi*. Springer-Verlag, Berlin.

[4] I. Kant (1969). Prolegomena to any future metaphysics, in *Ten great works of philosophy*, ed. R. D. Wolff. London.

[5] E. Mach (1914). *The analysis of sensations*. Open Court, La Salle, IL.

[6] H. Hertz (1894). *Die Prinzipien der Mechanik in neuen Zusammenhange dargestellt*. Barth, Leipzig.

[7] T. Kuhn (1970). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press.

[8] T. Kuhn (1977). *The essential tension*. University of Chicago Press.

[9] I. B. Cohen (1977). *Revolution in science*. Belknap Press, Cambridge, MA.

[10] E. Scheibe (1988). The physicists'conception of progress. *Studies in History and Philosophy of Science*, **19**, 141—159.

[11] K. Popper (1974). Intellectual autobiography, in *The philosophy of Karl Popper*, Book I, ed. P. A. Schilpp. Open Court, La Salle, IL.

[12] E. Broda (1973). Philosophical biography of Ludwig Boltzmann, in *The Boltzmann equation: theory and application*, ed. E. G. D. Cohen and W. Thirring, pp. 7—52. Springer-Verlag, Vienna.

[13] A. D. Wilson (1993). Boltzmann's philosophical education and its bearing on his mature scientific epistemology, in *Proceedings of the International Symposium on Ludwig Boltz-mann*, ed. G. Battimelli *et al.*, pp. 57—69. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna.

[14] R. Zimmermann (1852). *Philosophische Propädeutik*. Vienna.

[15] S. G. Brush (1976). *The kind of motion we call heat*. North-Holland, Amsterdam.

[16] P. Clark (1976). Atomism versus thermodynamics, in *Method and appraisal in the physical sciences*, ed. C. Howson. Cambridge University Press.

[17] M. R. Gardner (1979). Realism and instrumentalism in 19th century atomism. *Philosophy of Science*, **46**, 1—34.

[18] J. Nyhof (1988). Philosophical objections to the kinetic theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, **19**, 81—109.

[19] E. Mach (1883). *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch-kritisch dargestellt*. Barth, Leipzig [English translation: *The science of mechanics*, Open Court, La Salle, IL (1942)].

[20] L. Boltzmann (1895—8). *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vols. Barth, Leipzig [English translation: *Lectures on gas theory*, transl. by S. G. Brush, University of California Press (1964)].

[21] A. Einstein (1949). Autobiographical notes, in *Albert Einstein, philosopher-scientist*, ed. P. A. Schilpp. Open Court, La Salle, IL.

[22] H. W. De Regt (1996). Philosophy and the kinetic theory of gases. *British Journal for the Philosophy of Science*, **47**, 31—62.

[23] Y. Elkana (1974). Boltzmann's scientific research program and its alternatives, in *The interaction between science and philosophy*, ed. Y. Elkana, pp. 243—279. Humanities Press, Atlantic Highlands.

[24] E. N. Hiebert (1978). Boltzmann's conception of theory construction: the promotion of pluralism, provisionalism, and pragmatic realism, in *Proceedings of the*

1978 Pisa Conference on the History and Philosophy of Science, ed. J. Hintikka *et al.*, pp. 175—198. Reidel, Dordrecht.

[25] L. Boltzmann (1895). On certain questions of the theory of gases. *Nature*, **51**, 413—415.

[26] J. T. Blackmore (1982). Boltzmann's concessions to Mach's philosophy of science, in *Ludwig Boltzmann Gesammtausgabe: 8. Ausgewählte Abhandlungen der Internationalen Tagung Wien 1881*, ed. R. Sexl and J. Blackmore, pp. 155—190. Akademische Druck-und Verlagsanstalt, Graz.

[27] G. H. Bryan (1894). Prof. Boltzmann and the kinetic theory of gases. *Nature*, **51**, 176.

第十一章

[1] J. C. Maxwell (1860). Illustration of the dynamical theory of gases. Part I: On the motions and collisions of perfectly elastic spheres. Part II: On the process of diffusion of two or more kinds of moving particles among one another. Part III: On the collisions of perfectly elastic bodies of any form. *Philosophical Magazine*, Ser. 4, **19**, 48—62, 63—76, 76—80.

[2] R. Clausius (1858). Über die mittlere Länge der Wege, welche bei der Molekularbewegung gasförmiger Körper von den einzelnen Molekülen zurückgelegt werden; nebst einigen anderen Bemerkungenüber die mechanische Wärmetheorie. *Poggendorff's Annalen*, **105**, 239—258.

[3] J. C. Maxwell (1867). On the dynamical theory of gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **157**, 49—88.

[4] L. Boltzmann (1872). Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, II, **66**, 275—370.

[5] J. C. Maxwell (1866). On the viscosity or internal friction of air and other gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **156**, 249—268.

[6] L. Boltzmann (1868). Studien über das Gleichgewicht der lebendingen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **58**, 517.

[7] L. Boltzmann (1871). Über das Wärmegleichgewicht zwischen mehratomigen Gasmolek ülen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, **63**, 397.

[8] J. C. Maxwell (1873). On the final state of a system of molecules in motion subject to forces of any kind. *Nature*, **8**, 537—538.

[9] J. C. Maxwell (1879). On stresses in rarified gases arising from inequalities of tem-

perature. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **170**, 231—256.

[10] C. Cercignani (1990). *Mathematical methods in kinetic theory*, rev. edn. Plenum Press, New York [1st edn 1969].

[11] C. Cercignani (1988). *The Boltzmann equation and its applications*. Springer-Verlag, New York.

[12] C. Cercignani, R. Illner, and M. Pulvirenti (1994). *The mathematical theory of dilute gases*. Springer-Verlag, New York.

[13] J. C. Maxwell to P. G. Tait. August 1873. [Quoted in a footnote, p. 114, of: C. G. Knott, *Life and scientific work of Peter Guthrie Tait*, Cambridge (1911)].

[14] J. C. Maxwell (1879). On Boltzmann's theorem on the average distribution of energy in a system of material points. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, **12**, 90—93.

[15] H. K. Kuiken (1996). H. A. Lorentz: sketches of his work on slow viscous flow and some other areas in fluid mechanics and the background against which it arose. *Journal of Engineering Mathematics*, **30**, 1—18.

[16] G. L. de Haas-Lorentz (Ed.) (1957). *H. A. Lorentz: impressions of his life and work*. Amsterdam.

[17] A. Einstein (1954). *Ideas and opinions*. Bonanza Books, New York.

[18] H. A. Lorentz (Committee President) (1926). *Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918—1926*. Algemeene Landsdrukkerij, The Hague.

[19] A. Knox (1900). H. A. Lorentz contributions to kinetic gas theory. *Annals of Science*, **47**, 591—606.

[20] H. A. Lorentz (1891). Zur Molekulartheorie verdünnter Lösungen. *Zeitschrift für Physikal-ische Chemie*, **7**, 36—54.

[21] L. Boltzmann (1890). Die Hypothese van't Hoffs über den osmotischen Druck vom Stand-punkte der kinetischen Gastheorie. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, **6**, 474—480.

[22] L. Boltzmann (1891). Nachtrag zur Betrachtung der Hypothese van't Hoffs vom Stand-punkte der kinetischen Gastheorie. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, **7**, 88—90.

[23] H. A. Lorentz (1907). Ludwig Boltzmann. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, **9**, 206—238.

[24] W. Ostwald (1924). *L'Energie*, French translation by E. Philippi. Alcan, Paris.

[25] J. Dalton (1808, 1810, 1827). *New system of chemical philosophy*, Vol, 1, Parts 1 and 2, Vol. 2. Bickerstaff.

[26] D. Mendeleev (1891). *The principles of chemistry*, Vol. 1, translated from the 5th Russian edn by G. Kamenski. Greenaway, London.

[27] L. Boltzmann (1905). *Populäre Schriften*. Barth, Leipzig.

[28] G. Helm (1890). Ueber die analytische Verwendung des Energieprincip in der Mechanik. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, **35**, 307—220.

[29] J. C. Maxwell (1856). On Faraday's lines of force. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, **10**, 27—83.

[30] H. Hertz (1892). *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*. Barth, Leipzig.

[31] Lord Salisbury (1894). Inaugural address at the British Association. *Nature*, **50**, 339—343.

[32] L. Boltzmann (1895—8). *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vols. Barth, Leipzig.

[33] G. Helm (1896). Zur Energetik. *Wiedemann's Annalen*, **57**, 646—659.

[34] L. Boltzmann (1974). In *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig (1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[35] S. Brush (1976). *The kind of motion we call heat*. Elsevier Amsterdam.

[36] M. Planck (1909). Zur Mach's Theorie der physikalischen Erkenntniss. Eine Erwiderung. *Physikalische Zeitschrift*, **11**, 1186—1190.

[37] M. Planck (1904). Über die mechanische Bedeutung der Temperatur und der Entropie, in *Festschrift Ludwig Boltzmann*, pp. 113—122. Barth, Leipzig.

[38] M. Planck (1909). Die Einheit des physikalischen Weltbildes. *Physikalische Zeitschrift*, **10**, 62—75.

[39] M. Planck (1933). *Ursprung und Auswirkung wissenschaftlicher Ideen*. Berlin.

[40] W. Nernst (1893). *Theoretische Chemie*. Enke, Stuttgart [English translation: W. Nerst, *Theoretical chemistry*, London (1911)].

[41] W. Nernst (1922). Zum Gültigkeitsbereich der Naturgesetze. *Die Naturwissenschaften*, **10**, 489—495.

[42] L. Meitner (1964). Looking back. *Bulletin of the Atomic Scientists*. **20**, (Nov.), 3.

[43] L. Flamm (1956). Zum 50. Todestag von Ludwig Boltzmann. *Physikalische Blätter*, **12**, 408—411.

[44] G. Rabel (1920). Mach und die Realität der Aussenwelt. *Physikalische Zeitschrift*, **21**, 433—437.

[45] Anon. (1906). Der Lebenslauf Boltzmanns. *Die Zeit* (Vienna), No. 1420, 7 Sept., p. 2.

[46] S. Brush (1968). Mach and atomism. *Synthèse*, **18**, 207.

[47] J. T. Blackmore (1972). *Ernst Mach: his work, life and influence*. University of California Press, Berkeley.

第十二章

[1] L. Boltzmann (1895—98). *Vorlesungen über Gastheorie*, 2, vols. Barth, Leipzig.

[2] L. Boltzmann (1896). Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo. *Annalen der Physik*, **57**, 773—784 [English translation in: S. G. Brush, *Kinetic theory*, Vol. 2, *Irreversible processes*, pp. 218—228, Pergamon Press, Oxford (1966)].

[3] G. Cantoni (1868). Su alcune condizioni fisiche dell'affinità, e sul moto browniano. *Rend. R. Ist. Lomb. Science Lett.*, **1**, 56—67.

[4] J. H. Poincaré (1905). The present crisis in physics, in *Congress of Arts and Science, Universal Exposition, St. Louis, 1904*, I, p. 604. Houghton, Mifflin, Boston and New York [Reprinted in *The value of science*, transl. by G. B. Halsted, pp. 96—105, Dover, New York (1958)].

[5] A. Sommerfeld (1917). Zum Andenken an Marian von Smoluchowski. *Physikalische Zeitschrift*, **18**, 533—539.

[6] A. Pais (1982). *'Subtle is the Lord...': the science and the life of Albert Einstein*. Oxford University Press.

[7] A. Einstein (1949). Autobiographical notes. In *Albert Einstein, philosopher-scientist*, ed. P. A. Schilpp. Open Court, La Salle, IL.

[8] A. Beck and P. Havas (Eds.) (1987). *The collected papers of Albert Einstein*. Vol. I, *The early years*, English translation by A. Beck. Princeton University Press.

[9] M. Einstein (1924). *Albert Einstein, Beitrag für sein Lebensbild*. Manuscript. Einstein Archives, Princeton.

[10] C. Seelig (1960). *Albert Einstein*. Europa Verlag, Zurich.

[11] A. Einstein (1920). *On the special and the general relativity theory: a popular exposition*. Methuen, London [translation of *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, Vieweg, Braunschweig (1917)].

[12] M. Planck (1897). Über irreversible Strahlungsvorgänge. Erste Mitteilung. *Berliner Berichte* [*Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*], 57—68.

[13] M. Planck (1897). Über irreversible Strahlungsvorgänge. Zweite Mitteilung. *Berliner Berichte*, 715—717.

[14] M. Planck (1897). Über irreversible Strahlungsvorgänge. Dritte Mitteilung. *Ber-*

liner Berichte, 1122—1145.

[15] M. Planck (1898). Über irreversible Strahlungsvorgänge. Vierte Mitteilung. *Berliner Berichte*, 446—476.

[16] M. Planck (1899). Über irreversible Strahlungsvorgänge. Fünfte Mitteilung. *Berliner Berichte*, 440—480.

[17] M. Planck (1900). Über irreversible Strahlungsvorgänge. *Annalen der Physik*, **1**, 69—122.

[18] T. S. Kuhn (1978). *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894—1912*. Clarendon Press, Oxford.

[19] L. Boltzmann (1897). Über irreversible Strahlungsvorgänge. *Berliner Berichte*, 615—617.

[20] M. Planck (1901). Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik*, **4**, 553—563.

[21] M. Planck (1920). Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie. Nobel-Vortrag, Stockholm.

[22] M. Planck (1900). Über eine Verbesserung der Wien'schen Spektralgleichung. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, **2**, 202—204.

[23] L. Boltzmann (1877). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanis-chen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. *Wiener Berichte*, **76**, 373—435.

[24] M. Planck (1900). Zur Theorie des Gesetzen der Energieverteilung im Normalspektrum. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, **2**, 237—245.

[25] A. Einstein (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtpunkt. *Annalen der Physik*, **17**, 132—148.

[26] A. Einstein (1906). Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption. *Annalen der Physik*, **19**, 289—306.

[27] A. Einstein(1903). Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. *Annalen der Physik*, **11**, 170—187.

[28] A. Einstein(1905). Über die von der molekular kinetische Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, **17**, 549—560.

[29] A. Einstein (1909). Zur gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems. *Physikalische Zeitschrift*, **10**, 185—193.

[30] A. Einstein(1907). Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme. *Annalen der Physik*, **22**, 180—190.

[31] L. Boltzmann(1877). Über die Natur der Gasmoleküle. *Wiener Berichte*, **74**, 553—560.

[32] A. Avogadro(1833). Mémoire sur les chaleurs spécifiques des corps solides et liquides. *Annales Chimie et de Physique*, **55**, 80—111.

[33] H. F. Weber(1872). Die spezifische Wärme des Kohlenstoffs. *Poggendorf's Annalen*, **147**, 311—319.

[34] H. F. Weber(1875). Die spezifische Wärme der Elemente Kohlenstoff, Bor und Silicium. *Poggendorf's Annalen*, **147**, 367—423.

[35] H. F. Weber(1875). Die spezifische Wärme der Elemente Kohlenstoff, Bor und Silicium. *Poggendorf's Annalen*, **147**, 533—582.

[36] J. Dewar(1872). On the specific heat of carbon at high temperatures. *Philosophical Magazine*, **44**, 461—467.

[37] J. Dewar(1905). Studies with the liquid hydrogen and air-calorimeters. *Proceedings of the Royal Society*, **76**, 325—340.

[38] L. Boltzmann(1871). Analytischer Beweis des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie aus den Sätzen über das Gleichgewicht der lebendingen Kraft. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*, *Wien*, **63**, 712—732.

[39] W. Nernst(1911). Untersuchungen über die spezifischen Wärme bei tiefen Temperaturen. *Sitzungsberichte*, *Preussische Akademie der Wissenschaften*, 306—315.

[40] P. Debye(1912). Zur Theorie der spezifischen Wärmen. *Annalen der Physik*, **39**, 789—839.

[41] M. Born and T. Kármán (1912). Über schwingungen in Raumgittern. *Physikalische Zeitschrift*, **13**, 297—311.

[42] M. Born and T. Kármán(1913). Zur Theorie der spezifischen Wärmen. *Physikalische Zeitschrift*, **14**, 15—19.

[43] A. Pais(1991). *Niels Bohr's times*, *in physics*, *philosophy and polity*. Clarendon Press, Oxford.

[44] D. Hilbert(1916—17). Begründung der kinetischen Gastheorie. *Mathematische Annalen*, **72**, 562—577.

[45] S. Chapman(1916—17). The kinetic theory of simple and composite gases: viscosity, thermal conduction and diffusion. *Proceedings of the Royal Society*, **A93**, 1—20.

[46] D. Enskog(1917). *Kinetische Theorie der Vorgänge in mässig verdünnten Gasen*, *I. Allgemeiner Teil*. Almqvist & Wiksell, Uppsala.

[47] H. A. Lorentz(1909). *The theory of electrons*. Dover, New York.

[48] T. Carleman(1933). Sur la théorie de l' équation intégro-differentielle de Boltz-

mann. *Acta Mathematica*, **60**, 91—146.

[49] T. Carleman(1957). *Problèmes mathématiques dans la théorie cinétique des gaz*. Almqvist & Wiksell. Uppsala.

[50] H. Grad(1949). On the kinetic theory of rarified gases. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **2**, 331—407.

[51] C. Truesdell(1956). On the pressures and the flux of energy in a gas according to Maxwell's kinetic theory, Ⅱ. *Journal of Rational Mechanics and Analysis*, **5**, 55—128.

[52] V. S. Galkin On a solution of a kinetic equation. *Prikladnaya Matematikai Mekhanika*, **20**, 445—446.

[53] V. S. Galkin(1958). On a class of solutions of Grad's moment equations. *PMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, **22**, 532—536.

[54] D. Morgenstern(1954). General existence and uniqueness proof for spatially homogeneous solutions of the Maxwell-Boltzmann equation in the case of Maxwellian molecules. *Proceedings of the National Academy of Sciences (U. S. A.)*, **40**, 719—721.

[55] L. Arkeryd(1972). On the Boltzmann equation. Part Ⅰ: Existence. *Archives for Rational Mechanical Analysis*, **45**, 1—16.

[56] L. Arkeryd(1972). On the Boltzmann equation. Part Ⅱ: The full initial value problem. *Archives for Rational Mechanical Analysis*, **45**, 17—34.

[57] C. Cercignani(1988). *The Boltzmann equation and its applications*. Springer-Verlag, New York.

[58] C. Cercignani(1990). *Mathematical methods in kinetic theory*, rev. edn. Plenum Press, New York[1st edn 1969].

[59] C. Cercignani, R. Illner, and M. Pulvirenti(1994). *The mathematical theory of dilute gases*. Springer-Verlag, New York.

[60] L. Boltzmann(1905). *Populäre Schriften*. Barth, Leipzig.

[61] L. Boltzmann(1974). *Theoretical physics and philosophical problems* [English translation from *Populäre Schriften*, Leipzig(1905)], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht.

[62] B. D'Espagnat(1995). *Veiled reality. An analysis of present-day quantum mechanical concepts*. Addison-Wesley, Reading, MA.

后　记

[1] D. Flamm(1983). Ludwig Boltzmann and his influence on science. *Studies in History and*

Philosophy of Science, **14**, 255—278.

[2] A. Einstein (1905). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?. *Annalen der Physik*, **18**, 639—641.

[3] A. Einstein(1905). Über die von der molekular kinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, **17**, 549—560.