



《伟人与时代》书系

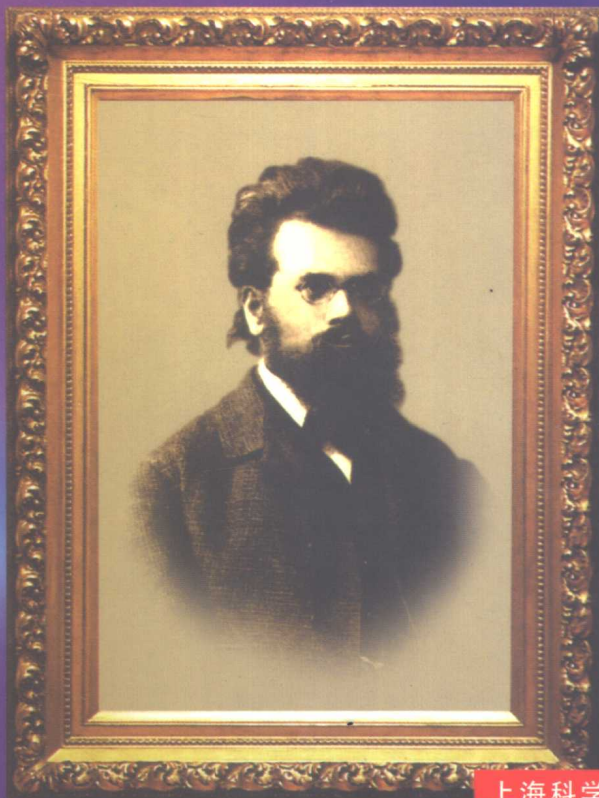
Ludwig
Boltzmann

玻尔兹曼

——笃信原子的人

[意] 卡罗·切尔奇纳尼 著

胡新和 译



上海科学技术出版社

玻尔兹曼

—— 笃信原子的人

[意] 卡罗·切尔奇纳尼 著

胡新和 译

上海科学技术出版社

内 容 提 要

路德维希·玻尔兹曼(1844~1906),标志着物理学从19世纪到20世纪的转折点,本书记录了这位伟大的科学家的生平、个性及其科学和哲学成就,详尽描述了他丰富而具悲剧性的生活(他于62岁时自杀身亡)。本书主要集中在19世纪下半叶的情境中讨论他的科学和哲学思想。他是宏观物体存在一个微观的、原子的结构基础这一学说的主要创立者,本书不仅证明了上述事实,同时也证明该学说深深影响了普朗克的光量子假说和爱因斯坦关于布朗运动的研究,从而凸显了玻尔兹曼对现代物理学的诞生所产生的巨大影响。



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晚近的事。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（“纠缠”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的所揭示）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

XI

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。

xii 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 10 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，它们看上去非常深邃，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

I

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，遵循玻尔兹曼，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。

- 4 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