

领域。经过两年的思考,玻尔兹曼于 1868 年在其“关于运动质点活力平衡研究”的文章中,把麦克斯韦的气体分子速度分布律,从单原子气体推广到多原子乃至用质点系看待分子体系平衡态的情况,把统计学的思想引入分子运动论。也正是这篇出色的文章,使玻尔兹曼获得了大学任教的资格,并于 1869 年受聘于奥地利的格拉茨大学任讲师职位。从此,时龄 25 岁的玻尔兹曼正式开始了他的教学与科研生涯,并开始在国际物理学界逐渐崭露头角。

活跃在物理与哲学的前沿阵地

自从玻尔兹曼将统计学的思想引入到分子运动论之后,1872 年他发表了研究气体从非平衡过渡到平衡的过程(迁移过程)的成果,即关于气体分子分布函数 $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ 的著名的玻尔兹曼方程:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_x \frac{\partial f}{\partial x} + v_y \frac{\partial f}{\partial y} + v_z \frac{\partial f}{\partial z} + X \frac{\partial f}{\partial v_x} + Y \frac{\partial f}{\partial v_y} + Z \frac{\partial f}{\partial v_z} = \iint (f' f'_1 - f f_1) d\omega \Lambda d\Omega. \quad (1)$$

方程描述了由分子组成的气体的统计性质。在科学史上,这是人们所发现的支配几率随时间变化的第一个方程。这个错综复杂的数学证明,不仅在以后的 40 多年里没有谁能解出,直到 1916 年恩斯科格和查普曼才分别求出了对于稀薄气体的解,而且时至今日,它作为一个普适方程,仍然不失其昔日的光彩。特别是在经适当修改后的玻尔兹曼方程,如今已被广泛地运用于现代技术的其他领域之中,诸如用于研究流体、等离子体和中子的输运过程,等等。

1877 年,玻尔兹曼用统计的方法,将熵 S 和系统相应的热力学状态的几率 W 联系起来,导出了有关熵的公式,即 $S \propto \ln W$ 。

1900 年,普朗克(M. Planck)引进了比例系数,写出了玻尔兹曼-普朗克公式

$$S = k \ln W. \quad (2)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数。这样,玻尔兹曼就给出了热力学第二定律和熵以统计性的解释,揭示了热力学第二定律的统计本质。这就是说,对于一个孤立系统内部发生的过程总是从热力学几率小的状态向热力学几率大的状态过渡,这就给不可逆性做出了生动的微观说明。使单个微观粒子服从牛顿力学的可逆性和大量粒子表现的不可逆性得到了统一。这是 19 世纪理论物理学最重要的成果之一。

玻尔兹曼认为,在理论上,热力学第二定律所

禁止的过程,即熵自发减小或热力学函数 H 自发增加的过程,不是绝对不可能发生的,只是出现的几率非常小而已。根据这些思想,玻尔兹曼对当时著名的“可逆性佯谬和循环佯谬”进行了解释。在多年精心研究的基础上,玻尔兹曼先后于 1896 年和 1898 年,分别完成了至今仍具有重大学术价值且被译成多国文字的经典名著《气体理论讲义》。为 20 世纪物理学的发展由“存在”转向“演化”的过程迈出了决定性的一步。

此外,玻尔兹曼通过大量的实验,不仅准确地测定了许多物质的折射率,从而证实了麦克斯韦理论的预言:物质的光折射率是它的相对介电常数和磁导率的乘积的二次方根,而且从实验上论证了在各向异性媒质中不同方向的光速是不同的。与此同时,玻尔兹曼又以他从理论上经过严格的推导(1844 年),以及他的恩师根据实验结果而猜想到的(1879 年)“斯特藩-玻尔兹曼定律”,为后来普朗克提出“黑体辐射理论”提供了很大的启示。

玻尔兹曼在运用力学机制和原子论的思想研究自然现象的过程中做出了卓越贡献的同时,也表明了自己的哲学立场。他在哲学上是一个唯物论者,可是他企求把物理现象都归结为力学问题。他指出,如果采用明确的力学假设与恰当的数学手段所得到的结论同经验事实相一致,那么,即使这个假设并不能说明事物的全部本质,也应当承认它的客观性。气体分子运动论的假设正是如此。玻尔兹曼认为,人们运用逻辑推理时,通常喜欢用自己看到的或感觉到的经验来做比喻,然而,当需要抛弃这种现象类推的方法去深入分析问题的内在本质时,却变得十分固执和愚蠢。

为了系统地表述自己的见解,玻尔兹曼从 1895 年之后逐步转向科学方法论的研究,并于 1897 年出版了《力学讲义》第一卷。在该书中,他从认识的心理图像论的观点出发,论证了原子不是纯粹的形而上学的概念,而是作为一种内在的心理图像而存在着的,原子的实在性同心理图像在本质上是一致的。心理图像既超越于经验,但又与经验相联系。玻尔兹曼指出,物理学的任务就在于建立一个外部世界的图像,正是这种图像引导着或指挥着物理学家的思维和实验;反过来,实验又能使图像得到不断的修正和完善。据此,物理学理论的建构可以使用不能被当时实验所证实的假设,然后再将这种假

设通过日后实验的不断检验加以重新调整,进而使理论描述符合于外部世界的本来面目。显然,玻尔兹曼的这一观点同现代物理学的研究传统是相吻合的。因为伴随着 20 世纪物理学理论研究的高度数学化、抽象化和形式化的倾向,物理学家们越来越认定理论物理学的“创造性原则寓于数学之中”。这里的数学模型就是玻尔兹曼所说的心理图像,即海森堡(W.K.Heisenberg)所称谓的心理意象。足见,玻尔兹曼在科学方法论方面也成了物理学从 19 世纪向 20 世纪转型时期的传承者。与此同时,尽管他试图将物理现象全部归结为力学问题,显得有些偏颇,但是,正是由于他的研究,才使人们认识到不可逆性和具有时间反演不变性的牛顿力学有着不可调和的矛盾,这本身也是一项伟大的贡献。在他后半生的论著中,哲学多于科学。并同马赫(E.Mach)的经验主义和奥斯特瓦尔德(F.W.Ostwald)为首的唯能者进行了不懈的斗争,虽然他和奥斯特瓦尔德的私交很好。特别是到了晚年,玻尔兹曼不仅大量地阅读了各种哲学著作,而且还对数学、逻辑与语言学等问题进行了系统的研究。因为他决心重新寻找一条研究哲学的有效途径。

执着于教坛赢得了学生的青睐

在上文中我们曾提及,玻尔兹曼于 1869 年担任了格拉茨大学讲师职位。4 年后他以精益求精的执教风范和渊博精深的学术水平,晋升为教授。但由于生活及工作方面的原因,从 1873 年被聘为教授到 1906 年去世之前,他分别在维也纳大学、格拉茨大学、德国慕尼黑大学和莱比锡大学担任了教授职务。在这 4 所著名的大学中,玻尔兹曼所讲授的课程主要有:热力学、电磁学、数学和化学;晚年还在维也纳大学继任了马赫的职位,重新组建了该校的哲学研究所,并开设了哲学讲座。

玻尔兹曼是一位深得学生高度赞赏的优秀教师,对学生极为严格、认真负责、关怀备至,而不以权威自居。他讲课的思路十分清晰,从不照本宣科。他总是从身边常见的自然现象出发,以各种具体生动的实例,对一些基本概念进行不厌其烦地、深入浅出地反复论证,使学生能够充分地理解、掌握和运用基本概念和基本原理,注重于培养学生的理解和独立思考的能力。凡是系统地聆听过玻尔兹曼所传授过的课程的学生,都能深刻地领略到,当透彻理解了一个基本原理和概念的真谛时那种豁然

顿悟的无穷乐趣,欣赏到理性思维的威力。

玻尔兹曼还经常结合所授课程自行研制教具,试图以直观化的方式,诱导学生透彻理解深奥的物理学理论背景。例如,1891 年他为了讲好电磁学理论,专门设计了关于两个电路相互感应的双循环“力学模型”,这对于初学者而言,诸如此类的形象化教学所带来的效果,显然是无法估量的。几年后,索末菲(A.Sommerfeld)就曾经将这一设计精美的模型,在他的力学教材中以相似的性质用于汽车分速器上。

通过对学生意志、愿望、兴趣的培养,以物理学研究的前沿课题为主要切入点,努力培养学生学研相兼的良好学习习惯,最大限度地发掘学生应有的潜力,这是玻尔兹曼培养学生创新能力的一大绝招。例如,他在大学主持讨论班时,总是以科学界最新发表的工作为中心,并且常常在讨论中确定他自己和学生们的科研项目。比如厄伦费斯特(P.Ehrenfest)的博士论文题就是在一次讨论过程中确定下来的。又如,1890 年,玻尔兹曼应聘到慕尼黑大学任理论物理学教授之后,他经常把学生请到家中,和学生促膝谈心,了解学生的发展意向。在极富启发性而又轻松愉快的交谈中,他经常结合自己的个人经验和体会,刻意将谈话的中心诱导到对科学前沿问题的探讨方面,以此启发学生能够主动站在科学发展的前沿领域,努力开展起源性的创新研究。

文理兼治、专博相融的基础知识,深入浅出的雄辩才华,和蔼可亲、热情好客的个性特征,使得玻尔兹曼的科学威望与日俱增,从而导致了其所领导的研究所最终成为世界各国优秀学生所向往的理想场所;理论与实验相结合的教学风格,循循善诱的育人方式,兴趣恰到好处的点拨与激发,以及研究方向的合理选择,使得玻尔兹曼培养和造就了一代科学精英。其中就有:先后于 1903 年和 1920 年分别荣膺诺贝尔化学奖的瑞典物理化学家阿累尼乌斯(S.A.Arrhenius)及德国的能斯特(W.Nernst),日本原子物理学家长冈半太郎(H.Nagaoka),理论物理学家厄伦费斯特以及他的继承人哈斯诺尔(G.F.Hasenohrl),等等。

人文底蕴丰厚 善于欣赏科学美

正如上文所述,由于玻尔兹曼出生在举世闻名的音乐之都,因此,维也纳的文化氛围对他的成长产生了极其深刻的影响。他酷爱音乐,擅长跳舞,

终生与钢琴为伴，并且是经常举行的家庭舞会中的活跃分子。甚至于他为了培养自己的孩子也对音乐产生兴趣，他在音乐厅还专门为全家人定有固定的席位。不仅如此，玻尔兹曼还爱好文学艺术，尤其是喜爱古典德国诗歌。其中席勒（F.Schiller）就是他所崇拜的诗人。对于席勒所给予他的影响，玻尔兹曼评论说：“我成为今天这样的人应该归功于席勒，如果没有他，可能也会有一个胡须和鼻子与我全然一般的人，但这个人不是今天的我。”

玻尔兹曼正是借助于音乐这种表达情感、诉诸情感的艺术，借助于诗歌这种自由度最大、最具普遍性的艺术门类，来进行“思维的自由创造”，开垦19~20世纪之间处于转型时期的物理学的处女地的。音乐、诗歌使他掌握了作曲家和诗人的创作方法和思维方式，训练了他的科学幻想力和敏锐“发现问题”的能力，从而使玻尔兹曼能够始终活跃在物理学与哲学的前沿阵地上，并在这两个领域的诸多方面都取得了举世瞩目的伟大成果。难怪爱因斯坦说：“在科学思维中，永远存在着诗歌的因素。真正的科学和真正的音乐要求同样的思维过程。”“艺术作品给我最高的幸福感受。我从中汲取的精神力量是任何其他领域所不及的……陀思妥耶夫斯基比任何科学家给我的都多，胜过高斯！”

虽然没有任何史料十分明确地表明玻尔兹曼专门论及过科学美。但是，钱德拉塞卡（S.Chandrasekhar）则以一个生动的范例，雄辩地佐证了玻尔兹曼是非常善于领略、玩味和鉴赏科学美的。钱德拉塞卡列举的例子指的是，玻尔兹曼将麦克斯韦关于气体动力学的论文当作神奇的交响乐来欣赏。他说：“一个音乐家能从头几个音节辨别出莫扎特、贝多芬和舒伯特的作品，同样一个数学家也可以只读一篇文章的头几页，就能分辨出柯西、高斯、雅可比、亥姆霍兹和基尔霍夫的文章。法国数学家的风度优雅卓群，而英国人，特别是麦克斯韦，则以非凡的判断力让人们吃惊。譬如说，有谁不知道麦克斯韦关于气体动力学理论的论文呢？……速度的变量在一开始就被庄严宏伟地展现出来，然后从一边切入了状态方程，从另一边又切入了有心场的运动方程。公式的混乱程度有增不已。突然，定音鼓敲出了四个音节‘令 $n=5$ ’。不祥的精灵 u （两

个分子的相对速度）隐去了；同时，就如像音乐中的情形一样，一直很突出的低音突然沉寂了，原先似乎不可被超越的东西，如今被魔杖一挥而被排除……这时，你不必问为什么这样或为什么不那样。如果你不能理解这种天籁，就把文章放到一边去吧。麦克斯韦不写有注释的标题音乐……一个个的结论接踵而至，最后，意外的高潮突然降临，热平衡条件和输运系数的表达式出现，接着，大幕降落！”

在这里特别值得一提的是，玻尔兹曼在上述这一段精彩的道白中，还涉及了音乐艺术美和科学美的个体性。因为在他看来，对于作曲家和科学家而言，它们的审美情趣，都会随着他们的个性特质，或所受的文化教育，或所处的文化背景的不同而发生很大的差异。因此，凡具有极高的音乐或科学素养的人，均很容易从他们的作品中，将每一个创作者各具特色的风格加以区别。另外，在前文中我们所提及的方程（1）和方程（2），可以说是玻尔兹曼所创造的关于科学美方面的力作。例如方程（2），它以极其简洁而明快的数学语言，表明了一个深刻而宏伟的物理学基本思想：熵与状态几率的对数成正比。可谓是言简意赅，影响深远，在物理学中实属罕见。怪不得后人为了纪念他，以此公式作为玻尔兹曼的墓志铭，将其醒目地刻在维也纳中央公墓的玻尔兹曼墓碑上。

然而，令人十分痛惜的是，由于玻尔兹曼当年在与马赫和奥斯特瓦尔德的哲学论战中的孤独感，以及疾病（严重的精神沮丧和并发的气喘症）缠身等苦恼，他于1906年9月5日在意大利度假时，莫名其妙地在杜伊诺以上吊自杀的方式结束了自己的生命。玻尔兹曼的死因成为物理学史上极其痛心的一桩事件，它既为后人研究他的思想提供了想象的余地，同时也留下了一个永远难以揭开的谜。尽管玻尔兹曼是一位个性特点与研究风格大相径庭的物理学家，但是，他在推动和促进物理学由近代向现代转型方面所取得的显赫业绩，将与日月同辉；他以自己辉煌的科学人生，所揭示的科学研究与哲学研究之间所存在的内在相关性，至今仍具有重大的学术价值。

（安徽巢湖学院物理与电子科学系 238000）