物理史话：原子论和唯能论之争*

章晓敏†
（武警工程大学　基础部物理教研室　西安　710086）

2025－06－12收到
† email：zhangxiaomin_phys@163.com
DOI：10.7693/wl20250810
CSTR：32040.14.wl20250810

19世纪末，物理学界爆发了“原子论”(以玻尔兹曼为代表)与“唯能论”(以奥斯特瓦尔德和马赫为代表)之争。原子论(Atomism)承袭古希腊原子思想，认为物质由原子构成，为统计力学奠基，并启发了普朗克的量子假说。而唯能论(Energetics)受唯象热力学影响，主张世界本质是能量而非原子，马赫的哲学立场更被列宁批判为唯心主义。佩兰的实验最终证明了原子存在，标志着原子论胜利。然而，这场争论并非简单的对错之分。唯能论理念与爱因斯坦的质能方程相呼应，二者在物理学发展中留下深远影响。文章参考意大利作家切尔奇纳尼的《玻尔兹曼：笃信原子的人》[1]等史料，梳理这场辩论的脉络，旨在为大学物理教学与中文物理学史提供补充资料。

1　缘起

19世纪，随着蒸汽革命，人类进入工业时代，热学等自然科学迅速发展。19世纪中叶，唯象热力学蓬勃兴起，基于迈尔、赫姆霍兹和焦耳等人的研究[2]，能量守恒定律确立。克劳修斯改造卡诺定理，提出热力学第二定律，开尔文则从功热转换角度表述该定律。唯象热力学的发展促使奥斯特瓦尔德以能量观解释化学反应，摒弃化学原子论。

与此同时，基于原子假说的统计力学在19世纪下半叶崛起。克劳修斯、麦克斯韦与玻尔兹曼构建了完整体系，通过微观统计推导宏观规律。然而，由于实验条件限制，原子论仍停留在假想阶段，引发了物质本质之争。以玻尔兹曼为代表的“原子论”与奥斯特瓦尔德、马赫的“唯能论”在19世纪末展开激烈辩论。

2　玻尔兹曼和原子论

玻尔兹曼1844年出生于奥地利维也纳，19岁时考入维也纳大学学习数学与物理，三年后取得博士学位，随后历任格拉茨大学、维也纳大学、慕尼黑大学和莱比锡大学的教授职位。

玻尔兹曼的整个学术研究基于原子假说。古希腊时期，德谟克利特认为万物皆由原子和虚空组成，在希腊文中，“原子”即“不可分割的”，因此早期朴素的原子论认为“原子”是物质坚不可摧的最小基元[3]。文艺复兴之后，伽利略、笛卡尔和牛顿等科学家继承了原子论。牛顿曾把气体看作由相互之间具有斥力的微粒组成，由此解释玻意耳定律(温度一定时气体的压强和体积成反比)[2]，甚至牛顿倾向于光也是由微粒流组成，在真空或均匀媒质中作惯性运动[2]。19世纪初道尔顿将物理的原子论引入化学反应的解释，认为不同元素的原子质量和性质不一样，化合物由成整比的元素原子数组成，道尔顿的观念助力了19世纪化学原子论的蓬勃发展[4]。而19世纪下半叶，热力学的发展又呼唤时代的英雄能利用统计手段将微观层面大量原子分子的运动与宏观的热力学性质建立联系。克劳修斯最早将统计思想引入气体动理论，他不仅认识到气体的内能是分子随机运动的动能之和，还于1857年推导出平均自由程公式[2]。1859年麦克斯韦受克劳修斯的平均自由程论文的鼓舞，运用概率理论推导出了气体的速度分布[2]。

1866年，玻尔兹曼对麦克斯韦的速度分布律产生极大兴趣，两年后撰文明确指出动理论的研究必须引进统计学，而且证明了不仅仅单原子气体分子，能看成质点系的多原子分子在平衡态时都遵从麦克斯韦速度分布律。1871年玻尔兹曼又将气体分子的速度分布推广到有势场的情况[2]。玻尔兹曼并不满足于此，1872年他提出了H定理，并将其在《气体理论演讲集》中表示为：

$$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\leqslant 0\ ,$$

他用H函数描述系统随时间演化的趋势[2, 5]，在非平衡态下的气体分子分布会因分子间碰撞的统计规律逐渐趋于平衡态，他证明了平衡态是熵极大值的状态。玻尔兹曼的H定理引起了一些科学家的诘难，因为力学定律对时间是反演对称的，即分子间的碰撞可逆，但整个系统却不可逆，这令人费解；普朗克在学生时代也一度认为，原子论没有

* 武警工程大学基础前沿创新项目(批准号：WJY202403)

指明系统演化方向，这与热力学第二定律相违背，因而反对原子论[6, 7]。针对这些质疑，玻尔兹曼将熵和概率联系起来，对热力学第二定律进行了微观统计的解释[1]，他认为系统演化是朝着概率最大的状态(即平衡态)进行，而相反方向的演化并非不可能，只是“不可几”(概率极低)[8]。1900年普朗克将熵和概率的公式写成了我们熟知的形式(图1)：

$$S = k\log W\ .$$

玻尔兹曼的工作意义非凡，他被誉为“19世纪麦克斯韦和20世纪爱因斯坦的中间环节”[1]。

3 奥斯特瓦尔德、马赫和唯能论

奥斯特瓦尔德(1853年生于俄国)是著名化学家，因在催化领域的贡献荣获1909年诺贝尔化学奖(图2左)。19世纪，化学以原子论为基础发展，奥斯特瓦尔德起初也是原子论者。然而，80年代，他发现基于能量的方法在许多问题上比微观力学假设更成功，这促使他转向“唯能论”。在大学时，他的导师奥廷根曾推荐吉布斯等热力学家的作品，激发了他将热力学应用于化学的兴趣[9]。1887年，他发表了“能量及其转变”演讲[10]；1890年某个初夏之晨，他“顿悟”到：能量才是最根本的实在[10]。尽管黑尔姆等人早期已提出唯能论方法，奥斯特瓦尔德迅速成为该领域的核心人物，推动了19世纪末物理化学的发展[9]。

马赫(1838年生于奥地利)对奥斯特瓦尔德影响巨大(图2右)。他在《力学史评》中批判牛顿的绝对时空观，认为惯性效应源于物体间的相对作用，而非绝对空间[11]。马赫否定原子论，主张知识源于经验和感觉，拒绝超越经验的假设，认为热学可凭实验描述，无需依赖原子假设[1]。他的经验主义哲学被称为“经验批判主义”或“马赫主义”[12]，对传统的机械论体系形成冲击。马赫的思想方法深受奥斯特瓦尔德推崇，并促使后者坚定拥护唯能论。

4 交锋

1895年，奥斯特瓦尔德在德国贝吕克自然科学家会议上发表题为“克服科学的唯物论”演讲，公开反对原子论，玻尔兹曼当场起身与之展开激烈的辩论。关于这次会议上的辩论，德国物理学家索末菲于1944年在维也纳举办的纪念玻尔兹曼百年诞辰的演讲中提到：“唯能论的斗士是黑尔姆，他的后盾是奥斯特瓦尔德，而作为他们两人后盾的，则是马赫的哲学(马赫本人未出席该会议)……玻尔兹曼和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。”[1]

在贝吕克的辩论不久后，玻尔兹曼发表了《关于唯能论的数学表达》以作为对于唯能论者的第一次回击[1]，他在文中指出“当代的潮流，是尽可能清晰和自由的从假设出发，去构造现象的描述，并能产生精确的定律”，而唯能论者们妄图“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”。在文中玻尔兹曼逐一分析概括了持唯能论的学者奥斯特瓦尔德、黑尔姆等人的观点，他认为或许唯能论在解释热学现象时能使问题更简单明了，但是对于力学问题，唯能论的解释却显得非常牵强，最多不过能应用于“非常缓慢的运动”；他认为可以证明唯能论迄

图1 玻尔兹曼的墓碑，上面刻着熵公式

图2 唯能论阵营(左：奥斯特瓦尔德；右：马赫)

今为止“并非恰当，而且在教学上是有害的”。玻尔兹曼的文章发表后，奥斯特瓦尔德等人给与了回应。但这个回应在玻尔兹曼透彻有力的压倒性攻击面前是苍白无力的，玻尔兹曼紧接着又撰文《关于唯能论》来回答。他说“像眼下的这种关于唯能论讨论的进行，并不期待哪一方是对的，哪一方是错的，而旨在澄清观点。”他在文中认为唯能论者们试图证明单从能量出发也能推导出力学系统的相关运动定律，事实上还是预设了物体是质点系统，也即蕴含了原子论的假设。“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。”[1]

尽管玻尔兹曼以强大的数学功底有理有据的捍卫原子论，但是由于当时人们无法直接用实验手段观察到原子，因此原子模型始终只是假说，原子论也因此占据下风。玻尔兹曼在莱比锡大学的一位学生雅菲曾回忆道：“大约在1900年，两种科学思潮之间发生了激烈的斗争……奥斯特瓦尔德和他的追随者大胆宣称代表了‘无预设的科学’，他们要求物理和化学，甚至是像力学这样的演绎科学，必须具有纯粹描述性(现象学)的特征，这种特征应该建立在很少的一般原理上，譬如热学的两个主要定律，应该把可观测的数据与这些原理对应起来，而非使用详细模型。另一边是原子论的追随者，他们在当时多少处于劣势，他们不得不承认，他们的建构仅仅是模型……”[13]

事实上，如在第二部分提到的，普朗克最初也是反对原子论的。1879年，普朗克博士论文的主题是热力学，他极力强调热力学不依赖原子假说也能够得出有用的结果[6]。1882年时他认为原子论和热力学第二定律(熵增)的矛盾是不可调和的，因为以原子论为基础的微观粒子的机械运动没有指明自然过程的方向。因此他写道：“尽管原子理论在过去取得了巨大的成功，但我们最终不得不放弃它并支持物质连续的假设。”[7] 唯能论和原子论争辩的背后，事实上隐含着自古以来的两种对立观点：物质到底是连续的，还是不连续的？很快，到了1890年代，普朗克对于原子论的反对就减弱了，因为他意识到原子论给物理和化学现象统一带来的巨大威力，但他仍对原子论保持模棱两可的态度。直到普朗克开始研究黑体辐射问题，1900年，他发现为了解释与实验吻合得非常成功的辐射公式时，不得不从玻尔兹曼的观点出发来处理空腔谐振子的熵[14]，于是他变成了一个“热情的原子论者”[6]。

普朗克在吕贝克争议之后撰文《反对新唯能论》猛烈抨击奥斯特瓦尔德。与此同时，普朗克也反对马赫哲学，普朗克认为，世界统一的物理图景是“独立于感知的头脑的客观自然过程的反应”，而非如马赫哲学“把唯一的实在置于感觉中，确信物理学的目标是人类思维对人类经验最经济的判断”的基本信条[6]。普朗克对马赫哲学的反对，本质上是一个唯物主义者与唯心主义的对立。1904年他撰文写道：“它(马赫哲学)不能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。”[1]

虽然原子论与唯能论的争锋对立在19世纪与20世纪之交如火如荼，但有趣的是，玻尔兹曼本人却和奥斯特瓦尔德及马赫保持良好的私人关系，并在工作岗位上有着密切联系。1894年，玻尔兹曼受聘为奥地利维也纳大学物理学院院长，而马赫于次年成为维也纳大学的哲学和科学史教授，两人成为同事关系。1900年，在德国莱比锡大学建立了一个规模很大的研究中心的奥斯特瓦尔德向自己学院推荐玻尔兹曼，称他为“在德国国内和国际上最重要的物理学家”，于是玻尔兹曼受聘成为莱比锡大学的理论物理教授，又和奥斯特瓦尔德成为同事。当时在莱比锡大学的同学们能看到两位持对立观点的教师以友好的方式并肩教学，学生们都分别支持自己的导师，也如火如荼的辩论起来[13]。“就像特洛伊城早期的一幕：当诸神(指玻尔兹曼及奥斯特瓦尔德)在云中战斗时，地上的普通人(指各自的学生)也在战斗，只不过他们的论据更弱，表达得更激烈。”1901年，马赫因为中风辞去维也纳大学的哲学教授，这一职位在1902年由玻尔兹曼接替，玻尔兹曼很快又回到了奥地利维也纳大学。玻尔兹曼在接替马赫哲学教授的就职演讲中提到：“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……在关于原子论的争论中，马赫在这群学者中突然简洁的说：我不相信原子的存在。这一说法传到了我的脑海里。”[1]

5 玻尔兹曼之死与“原子论”的胜利

在生命的最后十几年，玻尔兹曼饱受躁郁症的折磨，而与“唯能

论”者的辩论及分歧，无疑是导致玻尔兹曼精神状态变差的最重要的原因。1894年，玻尔兹曼从格拉茨大学回到维也纳大学任教，与马赫成为同事，虽然并未与马赫公开争吵，但是心理脆弱的玻尔兹曼为马赫对原子图景的敌意感到痛苦。1900年，玻尔兹曼为了缓解抑郁症状离开了维也纳，受聘为莱比锡的理论物理学教授，而在莱比锡奥斯特瓦尔德与玻尔兹曼不间断的争论同样令玻尔兹曼压抑，那个时候的玻尔兹曼“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”，并曾试图自杀。仅仅两年时间，1902年玻尔兹曼又回到维也纳大学，但维也纳流传着玻尔兹曼“患有精神疾病，已很难再胜任教授职责”的传言。

在1900年前后，玻尔兹曼的原子论在科学界是处于劣势的，唯能论者们喜欢把玻尔兹曼称作“最后的支柱”，当时在维也纳有人把玻尔兹曼的抑郁症归咎于这样一种“事实”：“他(玻尔兹曼)看到那幢建筑物(指原子论)摇摇欲坠，却无法阻止它倒塌，即使他动用了所有的数学技能。”[13]

在维也纳大学最后的几年，玻尔兹曼也因为过度工作而身负沉疴，在教学上，玻尔兹曼需要承担每周的理论物理学课程加上讨论班以及额外的本由马赫教授的哲学课。繁重的教学任务之余，还要从事科学研究，经费的不到位以及和同事之间对于物理仪器使用与掌控权的杯葛也令玻尔兹曼烦忧。在晚上玻尔兹曼饱受气喘和心绞痛的折磨，但仍然经常工作到凌晨5点。玻尔兹曼就这样不顾健康的全身心奉献给教学和科研事业。1906年9月，玻尔兹曼在小村庄杜伊诺与妻女度假时上吊结束了自己的生命。而在他自杀的第二天，他本该回维也纳大学授课。他去世后维也纳大学的理论物理课程停课了18个月。

玻尔兹曼的“殉道”[15]令人唏嘘，他的外孙弗拉姆曾评论：“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。”[1]更令人唏嘘的是，在玻尔兹曼去世仅仅两年后的1908年，法国科学家佩兰的实验宣告了玻尔兹曼“原子论”的胜利。

佩兰的实验需要从布朗运动说起。1827年，英国植物学家布朗发现悬浮在液体表面的花粉颗粒或其他粉末在不停地做杂乱无章的运动，而微粒尺寸越小，运动越剧烈，称之为布朗运动。“原子论”者们认为花粉粒子的运动是由于受到周围液体分子持续不平衡的碰撞导致的。但是这一解释也仅仅是假说，缺乏定量理论与实验验证。在举世瞩目的1905爱因斯坦奇迹年，爱因斯坦除了发表狭义相对论和光电效应的文章外，还发表了一篇《热的分子运动论所要求的静止液体中悬浮粒子的运动》。在这篇文章中，爱因斯坦为布朗运动提供了定量解释。他认为布朗粒子的线度较小，因而受到各个方向液体分子的撞击不能完全抵消，所以布朗运动的本质是统计规律下的涨落现象；他还推导出了关于布朗粒子朝某一方向位移的分布公式：

$$\lambda = \sqrt{t}\sqrt{\frac{RT}{N}\frac{1}{3\pi kP}},$$

在这个公式中，布朗粒子的平均位移λ与时间t的平方根成正比，R为普适气体常量，T为绝对温度，k为液体摩擦系数，P是布朗粒子的有效半径，N为每克液体分子数。显然，根据该公式可以由可观测的物理量推导出每克液体所含的分子数N(即我们现在熟知的阿伏伽德罗常数N_A)[16]。三年后的1908年，法国物理学家佩兰看到爱因斯坦的这篇文章后深受启发，他精妙的设计了实验，改变布朗粒子的种类和大小以及液体的粘度，重复测出的N_A数值在不同情况下高度一致，从而证明了爱因斯坦关于布朗运动理论的正确，也即证明了液体分子的客观存在[17]。佩兰的实验最终给出了原子存在的证据。

在佩兰的实验之后，奥斯特瓦尔德转变了自己的观点。在1909年他的《普通化学基础》第四版前言中，他写道：“我完全清楚的认识到，不久前我们已经有了实验证据，证明物质的分粒的或颗粒状的本性——这样的证据原子假说已经寻找了一百年甚至一千年都未曾找到……通过一系列研究，最后由佩兰最完美的证明了布朗运动符合于分子运动假说的要求，这就使得连谨慎的科学家也有充分理由可以谈论关于充满空间的物质的原子性组成的实验证据了。原子假说由此提高了地位，成为一种基础巩固的科学理论……”[18]

佩兰的工作为这场物理学史上的辩论短暂的画上了一个句号。今天物质是由原子组成的这一观点已经深入人心，在扫描隧道显微镜、透射电子显微镜等先进实验表征手段下，我们能清晰的看到原子图像乃至对单个原子进行操控(图3)[19]。费曼曾说：“假如由于某种重大灾难，所有的科学知识都丢失了，只有一句话可传给下一代，那么怎样

才能用最少的词汇来传达最多的信息呢？我相信这句话是原子的假设——所有的物体都是由原子构成的。”[20]

“原子论”与“唯能论”之争在19世纪末还波及社会科学领域。奥斯特瓦尔德将“唯能论”升华为哲学上的“能量一元论”，主张世界本质为能量，试图调和唯物主义与唯心主义。而马赫的哲学(马赫主义)则直接倾向唯心主义，认为世界仅由人的感觉构成。

“唯能论”一度在欧洲盛行，并影响到俄国，部分革命者试图以此修正马克思主义[21]。为反击这股思潮，列宁花了8个月研究自然科学与哲学史，著成《唯物主义与经验批判主义》[12]，批判奥斯特瓦尔德为“伟大的化学家、渺小的哲学家”[12]，认为自然科学中的“唯能论”可作唯物主义理解，而哲学上的“唯能论”实为唯心主义的变种。他指出，能量在科学上指物质运动，哲学上若割离物质，只是暗藏的唯心主义[12]。

6 大辩论后续的科学发展

在自然科学领域，这场辩论始于热学研究，但远未止步于热学，草蛇灰线，对后续科学的发展以及新纪元的开辟起到了意想不到的作用。从中学时代我们就对一种说法耳熟能详：19世纪末在完备的经典物理大厦上空飘荡着“两朵乌云”，一朵是黑体辐射的“紫外灾难”，另一朵是迈克耳孙和莫雷的“零结果”。而从这两朵乌云的罅隙里，分别诞生了量子力学和相对论。但少为人知的是，这场始于热学研究的“原子论”和“唯能论”的大辩论背后，各自阵营所秉持的理念信仰与思想之光，则正是促进量子力学和相对论诞生的智慧钥匙。

正如第四部分所提到的，普朗克从一位“原子论”的反对者，到成为支持“原子论”的科学家，经历了一个漫长过程。1900年，当黑体辐射的最新测量结果显示长波段偏离维恩公式时，普朗克得出了一个新的黑体辐射谱分布函数公式，并在柏林科学院的会议上报道[7, 22]。为了给这个公式一个基本的推导，普朗克转向了玻尔兹曼关于熵的概率解释[14]。类比将P个粒子放入N个盒子的经典概率问题，普朗克假设有$P = U_N/\varepsilon$个能量单元要分配到N个辐射振子上，算出概率进而根据熵与概率公式算出辐射振子的熵，其中每个能量单元$\varepsilon = h\nu$，ν是辐射振子的频率，再根据熵、能量和温度的公式$\partial S/\partial U = 1/T$，以及能量与特定频率下辐射密度的关系，即得到最终黑体辐射的普朗克公式[14, 22]。普朗克这一举措被称为“绝望行动”[7]，他见识到了玻尔兹曼关于熵的概率解释的威力，从而从信奉“物质连续”“皈依”为“原子论”的信奉者[6]。事实上，最先引入能量离散假设的是玻尔兹曼在1872年为了推导麦克斯韦分布所使用的数学技巧[1, 22]，而1900年末的推导，普朗克也仅仅把能量量子当成一种纯粹的数学形式假设，并未意识到它即将开启物理的新纪元。直到1908年至1911年，普朗克才确信量子理论标志着物理学领域的新篇章[7]。

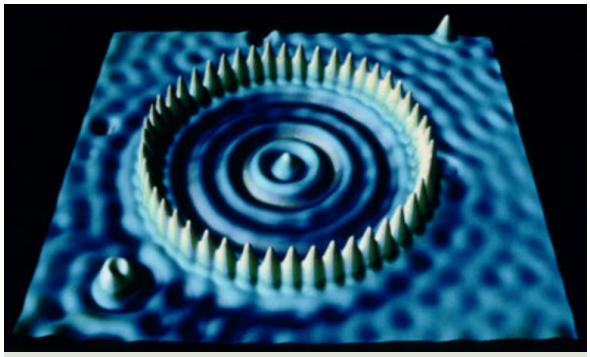

图3 IBM公司用扫描隧道显微镜拍下的原子图像，操纵48个Fe原子在Cu表面形成原子围栏[19]

“原子论”者认为物质微观上不连续，而真相是连能量也是不连续的！古希腊以来对物质不连续性的信仰映照了量子世界。正如意大利作家切尔奇纳尼所言：“正像圣保罗在前往大马士革的路上一样，普朗克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。”[1] 普朗克的工作无疑成为“连接玻尔兹曼与量子力学的纽带”[1]。

“唯能论”则体现了马赫思想的系统应用。马赫以经验与感觉为第一性，反对超越事实的模型，不信任何未亲眼所见之物，因此批判牛顿的绝对时空观，否认以太存在。1887年，迈克耳孙—莫雷实验测得光速各向相等，经典力学面临危机。洛伦兹与庞加莱仍试图保留绝对时空框架，而受马赫影响，爱因斯坦勇敢跳出框架，提出“相对性原理”，从而创立狭义相对论。

此外，马赫对牛顿旋转水桶实验的批驳——惯性源于物体间相对加速(马赫原理[23])——启发爱因斯坦提出等效原理，并最终于1915年创立广义相对论。1930年，爱因斯坦称马赫为“广义相对论的先驱”[24]。

另外，在任何版本的大学物理教科书及许多科普文章中，我们也都知道从狭义相对论可以推导出质能方程：$E = mc^2$。这个公式直接将

质量和能量划了等号!

今天在物质是由原子组成的这一观念深入人心后，我们更知道了原子内部的微结构，核外电子云分布在原子核周围，而原子核由质子和中子组成，质子和中子由夸克组成。而据现代物理学研究表明，在原子的质量中，夸克和电子只贡献百分之一，而剩下的绝大部分质量是由夸克间强相互作用的势能与夸克在囚禁位置振动的动能所贡献，即能量E提供其质量$m=E/c^2$! 而那百分之一基本粒子，即夸克和电子的质量的起源，根据规范场理论和希格斯机制[25]，是由于其对应的费米子场和希格斯场发生耦合相互作用，由于对称性破缺，遍布宇宙的希格斯场基态能量值不为零。由此看来，最终物质的形成，是有能量的场的耦合与激发，并且根据质能方程，能量直接提供了质量，那么马赫等人的“唯能论”以现代物理学的视角来看，是否有独到的先见之明呢?

7 大辩论对于大学物理教学的启示

历史的错综曲折与辩证历程让我们从中汲取了丰富的精神养料。在大学物理课堂，这一物理学史上的大辩论正好成为我们教材内容以外的有益背景补充。在进行热学模块授课时，可以适时给同学们引入这一物理史话，从而让同学们在课本之外有更多的思考与收获。

热学的统计力学与热力学分别从微观与宏观角度阐述热现象，“原子论”与“唯能论”之争本质上源自这两种研究路径。在当时看似对立不可调和，但实际上只是切入角度不同，体现了对立统一性。佩兰的实验证明了原子存在，“原子论”胜利，而哲学上的“唯能论”被列宁批判为唯心主义。然而，“唯能论”与相对论的质能方程相呼应，现代物理认为原子的质量几乎源于能量，反映了人类认知否定之否定的螺旋上升。玻尔兹曼在与“唯能论”者的辩论中不懈坚持，最终为科学殉道，其纯粹与执着令人动容。

这场19世纪末的热学大辩论，背后思想最终阴差阳错地分别催生了量子力学与相对论，启示我们科学发展是相互联系的。它激励学生构建物理学的整体认知框架，理解力学、热学、电磁学、光学和近代物理虽分开学习，但在发展中相互交织，帮助建立紧密联系的知识网络与正确的思维方式。

参考文献

[1] 卡罗·切尔奇纳尼 著. 胡新和 译. 玻尔兹曼:笃信原子的人. 上海:上海科学技术出版社,2006

[2] 郭奕玲,沈慧君. 物理学史(第2版). 北京:清华大学出版社,2005. pp.50—56,70—71,135,74—76,79—81,84

[3] 赵凯华,罗蔚茵. 热学. 北京:高等教育出版社,2005. p.15

[4] 道尔顿 著. 李家玉,盛根玉 译. 化学哲学新体系. 北京:北京大学出版社,2006. pp.导读,5—9

[5] Boltzmann L. Brush S G Translated. Lectures on Gas Theory. Berkeley: University of California Press, 1964. pp. 25—29

[6] Heilbron J L. The Dilemmas of an Upright Man. Berkeley: University of California Press, 1986. pp. 9—14, 20, 48—49

[7] Kragh H. Physics World,2000,13(12):31

[8] Lebowitz J L. Physics Today , 1993 , 46(9):32

[9] Deltete R J. Foundations of Chemistry, 2007,9(1):3

[10] 李醒民. 哲人科学家——奥斯特瓦尔德. 福州:福建教育出版社,1993. pp. 89,92

[11] 胡凯华. 大学物理,1999,14(11):32

[12] 列宁 著. 曹葆华 译. 唯物主义与经验批判主义. 北京:人民出版社,1957. pp. 5—6,273—274

[13] Blackmore J. Ludwig Boltzmann: His Later Life and Philosophy, 1900-1906. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995. pp.75—76

[14] Planck M. Annalen der Physik, 1901, 4:553

[15] 陈敏伯. 科学. 2003,55(1):54

[16] 爱因斯坦 著,范岱年,赵中立,许良英 编译. 爱因斯坦文集(第二卷). 北京:商务印书馆,2017. pp.80—91

[17] Perrin J. Hammick D L Translated. Atoms. London:Constable & Company, 1923. p.105

[18] 李佩珊,许良英 主编. 20世纪科学技术简史. 北京:科学出版社,2004. p.75

[19] Binnig G, Rohrer H. Reviews of Modern Physics,1999,71(2):S324

[20] 费曼,莱顿,桑兹 著. 郑永令,华宏鸣,吴子仪 等 译. 费曼物理学讲义:新千年版(第1卷). 上海:上海科学技术出版社,2020. p.2

[21] 哲之. 广西师范大学学报(哲学社会科学版),1973,6:33

[22] 曹则贤. 黑体辐射:一只会下物理金蛋的鹅. 北京:世界图书出版有限公司北京分公司,2024. pp.110—115,p.43

[23] 赵峥. 物理,2015,44(10):649

[24] 爱因斯坦 著,许良英,李宝恒,赵中立 等编译. 爱因斯坦文集:增补本(第一卷). 北京:商务印书馆,2009. p.397

[25] 何红建,邝宇平. 物理,2024,53(1):1