

热学的物理图像与认知路径

崔琰¹ 张玉峰² 陈征^{3,†}

(1 北京市海淀区教师进修学校 北京 100195)

(2 北京教育科学研究院 北京 100036)

(3 北京交通大学物理科学与工程学院 北京 100044)

2022-08-02收到

† email:chenzheng@bjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220812

1 冷热感知是热学研究的起点

冷热与人类的生存息息相关,因此人类很早就基于自身的感知、观察和朴素的思考开始了对热现象的认识(图1)。由于太阳和火总是给我们带来热的身体感受,因此东西方古代哲学体系中的热总是和太阳或火紧密联系。我国古代哲学中的阴阳学说把热列为“阳”的性质之一,后来的五行学说中热则包含在“火”之内。古希腊哲学将世界归为“水、火、土、气”四种元素,而热属于“火”和“气”的结合。

当然,“阳”也好,“火”也罢,往往是光与热现象的结合,还与人的另一感官——视觉交织在一起,所以人类对热的早期认识总体上是模糊而含混的。16世纪末17世纪初,伽利略发明了第一个可以直接观测冷热的装置;直到百年后的1714年,华伦海特在改进水银温度观测装置的基础上建立起华氏温标,人类对热的认识才终于走上了实验科学的道路,并在蒸汽动力应用技术发展的过程中日臻完善^[1]。1850年代热力学第一、第二定律的建立把热学的发展推到了高潮,到19世纪末时,热学已经与经典力学、经典电磁学一起成为物理学大厦三大核心支柱。20世纪最重大的物理学成果之一“量子力学”,也是在对热辐射问题的研究过程中被“催生”的。

今天热学的研究内容也已远远超出“冷热”,成为认识物质的性质、状态乃至微观结构和规律的“大学问”。可同时也因为它逐渐从直观的“冷热感知”深入到了越来越抽象的层次,其学习和理解的门槛也逐渐提高,给基础教育阶段的学习者造成了一定的困难。

2 热的流体图像

初学者认为热学难,因为太抽象。但抽象的概念绝不是凭空生造出来的,它们往往是在一些直观、具象事物的基础上,通过类比的方式构建起来,如本专栏前面文章曾介绍过法拉第基于磁铁周围铁屑图样构建的力线,麦克斯韦基于流管建立起的旋度、散度等概念等都是例子。

本系列“理解物理图像,善用类比思想”一文中曾较为系统地阐述流体图像下的热与能,诸位读者可以回顾相关介绍^[2]。当我们处理宏观的热现象问题时,把热看成某种流体,比如一汪清水,那么研究对象就可以看做一个“水池”,它的热容量就是这个“水池”的容量,比热容相当于“水池”的底面积,那么温度就对应着“水位”的高低,物体之间传递的热量可以类比成“水池”之间的水流量……热和功的转换与外界做功抽水或放水对外

做功的场景如出一辙。于是热容相关的计算问题变成了小学数学中那个连接着进水管和出水管的水池,一目了然。

进一步还可以把热力学第一定律类比为“水量”的守恒;热力学第二定律的克劳修斯表述所说的“不可能把热量从低温物体传向高温物体而不引起其他变化”,大致可以类比为“水”不能自动往高处流;而开尔文表述“不可能制成一种循环动作的热机,从单一热源取热,使之完全变为功而不引起其他变化”,则大致可类比为没有水动力装置能够工作在“水位”高度差的一汪死水之中。

在基础物理学习阶段,热学涉及的温度、内能、功、热量等几乎都能从一汪清水中找到合适的类比对象,从而建立起直观物理图像。

3 热的粒子运动图像

当然,采用流体图像并不意味着热真的是一种流体,它是一种辅



图1 冷与热源自于人的感知(图片来源于网络)

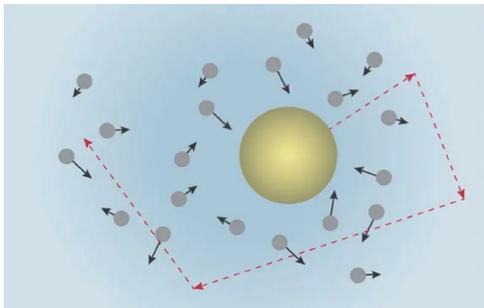


图2 微观粒子无规则热运动的宏观表现——布朗运动

助的手段。从培根、罗蒙诺索夫基于摩擦生热的哲学思辨，到伦福德伯爵的切削炮筒试验，以及后续焦耳对热功当量的测定，确定了热是一种运动形式。近代科学又提供了充分的证据支撑物质是由原子组成的观点，并且明确知道热的物理本质是微观粒子运动的宏观体现。所以20世纪以来，热学建立了另一种物理图像——“粒子运动”图像(图2)。

比如粗糙地解释气体压强的形成，就可以把每一个空气分子看成一个小球，利用冲量定理计算它和器壁之间产生的冲击力，然后把单位时间内能够撞上容器壁的所有分子小球个数数出来(通常是以单位面积作为底面，分子平均速度乘以单位时间作为母线长度构建一个柱体，然后用这个柱体的体积乘以里面的粒子数密度)，于是器壁上产生的压强就是所有分子碰撞冲击力之和。又比如温度这个量度物体“冷热”性质的抽象函数，借助粒子碰撞产生压强的计算，与理想气体状态方程结合就可以发现，原来它是分子平均平动动能的宏观表现。

由于“粒子运动”图像更接近客观事实，因此以上部分常被教科书作为宏观现象的“微观解释”使用。然而我们需要注意的是，以上是一种初级的、理想化的“粒子运

动”图像。

事实上组成宏观物体的微观粒子不会如此理想，粒子有着不同的动量、动能等参量，而且数量巨大的粒子在相互作用中不断改变运动状态，我们基本上无法像研究宏观物体那样掌握每一时刻每一个粒子的运动状态，只能试图用统计的方法找到大量粒子的一些整体信息，

比如速率分布、能量分布等，进而建立起今天物理学的一个重要分支——统计物理学。真正的“粒子运动”图像是统计的。

4 热学的认知路径

学习物理学有两条不同的路径，一条是知识体系的路径，即将已经发展成熟的概念、规律等梳理成一定的知识体系来进行学习；另一条是认知过程的路径，即按照人类对相关问题的认知历程来进行学习。前者的优点是体系完整，内容精炼，但由于学科建立的过程中，许多知识都存在演化的过程，导致学生在直接面对曲折演化的结果时无法还原从具象的自然现象到抽象的物理概念的过程，难以理解和掌握；而后者的优点是脉络清晰，易于理解，但任何一个学科的发展过程都不简单，完全按照认知过程会导致内容庞杂，有限学时中难以完成。

由于学时的限制是刚性的，所以物理教学通常采用知识体系的方式进行。但无论是教育者还是学习者都应意识到这种路径的局限性。以热学为例，基础物理教学的过程通常是从以理想气体三定律和状态方程为代表的气体分子动理论开始，先介绍宏观状态参量，然后是压强、温度等物理量的微观解

释，进而介绍统计物理的麦克斯韦速率分布、能量分布等。之后进入热力学部分，从准静态过程和热力学循环开始，按热力学第一定律、第二定律的顺序逐次展开，最后对热力学第三定律和第四定律做简要介绍^[3]。

从知识结构的角度这样的确是简洁完备的，但让我们考察一下这个教学顺序中学生脑海中的物理图像：内容从理想气体三定律和状态方程开始，此时的物理图像是真实直观的气体，是一种流体模型；然后进入微观解释的部分，物理图像切换成了理想化的初级“粒子运动”图像；进而引入麦克斯韦分布律，物理图像升级到统计版的“粒子运动”图像；接着进入热力学章节的准静态过程和热力学循环，这里又回到了热的流体图像；热力学第一定律在流体图像下做完整的介绍；热力学第二定律基于流体图像做了开尔文表述、克劳修斯表述之后，又回到统计的“粒子运动”图像下的玻尔兹曼表述。在这个过程中，物理图像多次切换，从具象的真实流体，到初级版“粒子运动”，升级到统计版“粒子运动”，再跳到抽象的热的流体模型，之后又跳到统计版“粒子运动”。在这一次次物理图像切换中，许多初学者被搞糊涂了，最终不得不放弃了学习。

笔者以为对于热学、电磁学这样相对抽象的内容，应在教学中还原必要的认识过程，在总体上采用知识体系学习的路径基础上，部分阶段采用认知过程的学习路径，可以起到事半功倍的效果。

如前两节所述的流体和“粒子运动”图像，正是人类按照“由表及里”的逻辑顺序认识热现象而逐渐形成的。18、19世纪时人们还停

留在主要研究宏观、表面问题的阶段，如热机中的物质如何通过循环对外做功，热和功之间的转化等，在这些问题中，流体这种宏观图像是十分直观且准确的，因此被广为接受和使用。而从19世纪初开始，道尔顿从化学角度建立原子论，阿伏伽德罗提出分子的概念，赫拉帕斯、瓦特斯顿、克勒尼希等提出热是分子运动的模型，克劳修斯系统论述理想气体分子模型并引入平均自由程等统计概念，到范德瓦耳斯实际气体方程的提出，麦克斯韦、玻尔兹曼等人对统计物理的奠基性工作，到了20世纪人类对物质的认识进入了微观领域，越来越多的实验证据加深了人们对热现象的理解，“粒子运动”图像成为揭示本质、深入探究的新工具。

在教学中，如按照历史脉络，先从流体这种比较容易与生活经验建立起联系的图像开始，完整地把理想气体定律和状态参量，热力学第一和第二定律等19世纪末之前的热力学主要内容做系统阐述；然后借助奥斯特瓦尔德唯能论与玻尔兹曼的原子论之争的历史故事，合理地引入粒子运动模型，进而对宏观流体图像下建立的物理概念进行微观解释。如温度、内能、焓、熵等核心概念就可以看做是在流体图像下建立，利用类比的方式把它们和水量、水量等建立联系，方便同学的理解，然后再讨论当物理学发展到微观领域时，从“粒子运动”图像角度对其抽象本质进行揭示。这样学生既能够清晰地构建起两种基本的物理图像，又能够从认知过程

的角度理解两种图像的先后顺序、优缺点和适用范围，热学便不再是令人糊涂难懂的学问了。

5 结语

物理图像的演变过程其实就包含了人类对相关现象由表及里、由具体到抽象的认识过程，与人的认知习惯和规律高度符合。因此将物理概念通过物理图像具象化，然后结合图像的演变过程把相关知识点组织成符合认知习惯和规律的体系，应能使教与学都事半功倍。

参考文献

- [1] 王竹溪. 热力学. 北京: 北京大学出版社, 2017
- [2] 强艳, 陈征. 物理, 2022, 51(6): 439
- [3] 吴柳. 大学物理学(下册). 北京: 高等教育出版社, 2021

CAEN VME程控高压电源系列



CAEN公司开发的VME桥接器具备多重控制功能，您可以将电源设备和DAQ数据读出设备放置在标准机箱中，通过GECO2020和CoMPASS两款软件轻松实现远程控制和数据读取！

大系统中的小系统！

V65xx系列电源特性：

- 最大功率6kV@3mA
- 低纹波
- 可提供高精度电流回读选项
- 6个独立高压通道
- 高压极性用户任意选定



官方授权代理商（中国）：
北京中检维康电子技术有限公司

www.phyclover.com
电话：86-10-88026700
邮箱：info@phyclover.com

www.caen.it
Small details... Great differences