

理解物理图像，善用类比思想

强艳¹ 陈征^{2,†}

(1 北京大学附属中学 北京 100080)

(2 北京交通大学物理科学与工程学院 北京 100044)

2022-06-02收到

† email:chenzheng@bjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220609

1 引言

物理学的诞生和发展是一个“始于集邮，终于思想”的过程。人类从自己的感官经验出发，对不同类型的自然现象进行观察和实验，在此基础上通过归纳总结形成唯象规律，然后进一步“公理化”成为用数学语言表达的简洁、完备、精确的理论体系。通过这个过程，那些看似不相干的表象背后的共性规律被揭示，各种各样的自然现象最终通过一组简单的命题，配合逻辑和数学运算规则就能解读和预言，从而实现“思维经济”，让人类有限的记忆和信息处理能力能够应对纷繁复杂的世界，这是物理学的精髓所在^[1]。

然而对初学者而言，直接面对物理学那些高度抽象的结论，当缺少从具象到抽象过程的必要了解时，就会陷入“上屋抽梯”的窘境，学习和理解就会遇到很大困难，要么干脆将其视为“天书”，要么囫圇吞枣地“记住”知识点。这就好像拿到了一个压缩文件，虽然这个文件里包含了丰富的信息，但没有对应的解压缩软件，用户无法还原压缩文件，也就无法提取其中的信息，自然无法使用。作为基础教育阶段的物理教师，提供给学生必要的“解压缩软件”，帮助他们了解物理学构建的中间过程和思维工具，才能让他们真正学懂和会用。

2 物理图像是具象与抽象的桥梁

“人类认知自然的基本途径是自己的感知，人类的物理学当然也处处留下感官经验的影子”^[2]。物理学家绝非凭空“变出”抽象的数学公式，在他们完成思考和抽象的过程中需要辅助工具，这就是物理图像。学界并没有给物理图像一个统一、严格的定义，但大体上指当人们面对所要研究的问题时，脑海中浮现出的某种具体的源自日常生活经验的场景。

在物理学建立的早期，无论是开普勒的行星运动、伽利略的斜面、惠更斯的碰球还是牛顿的流体，所研究的问题本身涉及的物体与物体间的相互作用都是生活中看得见摸得着的有形之物，能够对人的感官形成直接经验，这些场景就形成了原初的物理图像。而在之后对不那么直观的现象进行深入研究时，往往通过寻找其特征，然后将其想象为与之具有类似特征的有形之物，借助基于有形之物建立起的图景来进一步思考和抽象，形成描述相应对象的物理模型。比如热、电、磁等现象，物理学家最初都会把它们想象成为“一汪清水”那样的流体，然后依据已经在水流中建立的感官经验和从中总结出的“连续”、“守恒”等主要性质，提出对热、电、磁等现象的假说，做出预言并通过实验验证，进而得到相关领域的物理规律。

虽然随着研究的深入，最初的图像可能会被修正甚至放弃，但物理图像无疑在理论建立过程中起到了重要的辅助作用，且由于许多物理学分支领域采用了相似的物理图像，因而其理论模型和数学表达都有极高的相通性。深入理解了典型的物理图像，在不同领域遇到相关问题时就很容易举一反三，学习效率和活学活用的能力也会大大提高。

3 基于流体图像的热与能

热学是物理学习者必须了解的重要物理学分支，它在从以蒸汽机为代表的工业革命到今天的绿色能源发展中都发挥了重要的作用。但温度、内能、热量、熵等概念均十分抽象，给学习带来了巨大困难。将热想象成“一汪清水”，利用流体的物理图像来处理，便会得到事半功倍的效果。回顾热学的发展历史，物理学家们正是沿着这样的思路做的。1714年华伦海特改良水银温度计并制定了华氏温标，热力学从此走上实验科学的道路。最初解释实验现象的热学理论便是基于流体图像的，这就是“热质说”：“热是一种名叫热质的流体，可以渗透进一切物体中，不生不灭；一个物体是冷还是热，就要看它所含的热质是多少。”今天还在一定领域内使用的热量单位卡路里(calorie)就源自热质(caloric)。萨迪·卡诺正是在“热质说”的流体图像下，基于热质守恒(类似于流体的质量守恒)和永动机不可能实现推导出了著名的卡

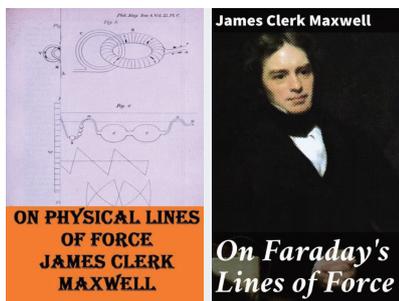


图1 麦克斯韦的著作《论物理力线》、《论法拉第力线》

诺定理。用他自己的话说就是“我们可以足够确切地把热的动力比之于瀑布，瀑布的动力取决于其高度和液体量，而热的动力则取决于其所用热质的量，以及热质的下落高度，即交换热质的两物体之间的温度差。”

培根由摩擦生热现象认为热应该是一种运动，罗蒙诺索夫在1746年的论文《论热和冷的原因》中中断言热是分子运动的表现，伦福德伯爵的切削大炮实验和戴维的冰摩擦融化实验进一步证实了热是一种运动而非热质，直到迈耶提出热是能量的一种形式，焦耳通过热功当量实验将功与热建立起定量联系，热质的概念才逐渐被抛弃。然而当我们用能量来描述宏观热现象时，仍会赫然发现它在我们脑海中浮现的图像还是某种流体，温度对应着“水位”高低，热量对应着“水流量”，热容量就像一个“水槽的容量”，比热容仿佛“水槽的底面积”，能量的传递和守恒类似于水流的连续流动与质量守恒。在此图像下，热现象和生活经验如此吻合，热力学第一、第二定律显得理所应当和一目了然，其数学模型的形式也和描述流体的模型如出一辙。

虽然20世纪物理学研究深入微观领域后，在探讨热的本质时流体图像被大量无规则运动的小球(分子运动图像)取代，需要引入统计方法

来描述对象的热性质。然而简洁的经典热力学，在处理宏观热现象相关问题时仍是主流，流体图像依然发挥着巨大的作用。

4 基于流体图像的电与磁

电磁学同样是物理学的重要组成部分，且和我们的生活已经密不可分。对物理学习者而言，它与热学存在同样的问题，看不见摸不着，概念和规律都显得抽象，我们也可以采用同样的方式来应对，把电和磁也想象成“一汪清水”。不过电磁学的情况略有不同，它涉及到几种不同的流体。

从1600年吉尔伯特《论磁》将电现象和磁现象区分开来以后，人们在研究电的过程中就把电看成一种承载电性质的流体，就像“热质”是承载热性质的流体一样。1729年斯蒂芬·格雷通过把摩擦过的玻璃棒与其他物体接触以后，可以让这些物体具有吸引其他物体的能力，说明电可以在物体之间传递，电是一种流质，而非某一个物体特有的属性。1733年法国科学家迪费发现和玻璃棒接触过的铜屑虽然互相排斥，但是它们却和与带电树脂接触过的铜屑相互吸引，由此进一步提出了电是两种不同性质的流体(双流体说)。1850年富兰克林用单流体说代替了双流体说，用一种性质流体的盈余与缺少解释同性相斥、异性相吸。虽然现代科学证明了电的载体源于原子内的带电基本粒子，但在描述宏观现象时，如同水位高差一般的电压(电势差)驱动的如水流一般的电流，仍是我们更常使用的图像。

从法拉第到麦克斯韦的工作重新把电和磁统一在一起，最终通过简洁的麦克斯韦方程组解决了大多数经典电磁学问题，这背后同样是流体图像在发挥作用。法拉第创造

性地提出了“场”的概念，把电和磁从限制在物质中的微粒扩展到了空间当中，他描述场的语言“力线”、“力管”等概念就脱胎于流体流动问题中的流线和流管。麦克斯韦更进一步在此图像的基础上，通过电场、磁场和不可压缩流体的类比建立了精确的数学模型。例如流体的流线发散意味着流速降低，那么电力线或磁力线的发散就意味着电场或磁场强度的降低；而感生电场涡旋的数学结构也与某种理想流体的涡旋完全一样。这些思想在他的《论物理力线》、《论法拉第力线》(图1)等文章中有充分的体现。而今天常用的梯度、旋度、散度等概念，正是麦克斯韦在《论物理量的数学分类》中基于流体图像构建的^[3]。

5 基于物理图像的类比

类比法在基础物理的教学中常常被使用，但往往是出于直觉的类比，流于解题技巧的层面，对于有深厚物理基础的教师而言一目了然，初学者却常常难以发现其中的联系。通过对物理学发展历程的回顾可以发现，类比法其实是物理学家开展工作的重要且底层的思维方法，这个方法的关键在于对物理图像的认识和理解。除了本文举例的流体图像之外，基础物理涉及到的物理图像还有粒子图像、波动图像等不多的几种。因此在教学过程中，以具体知识点为例，将相应的物理图像讲透，才能够充分发挥类比思维的力量。

参考文献

- [1] 陈征,张玉峰,魏红祥.物理,2021,50(01):54
- [2] 朝永振一郎.物理是什么.北京:人民邮电出版社,2017
- [3] 马尔科姆·朗盖尔.物理学中的理论概念.合肥:中国科学技术大学出版社,2017