

物理学的“语法”——物理定律的层次结构与物理理论的构建方法

2021-05-29收到

† email: chenzheng@bjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210610

张君可¹ 陈征^{2,†} 魏红祥³ 张玉峰⁴

(1 清华大学附属中学朝阳学校 北京 100027)

(2 北京交通大学理学院 北京 100044)

(3 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(4 北京教育科学研究院 北京 100036)

物理定律按物理学的语法描述物理符号间的关系，但只是对自然暂定的描述，而不是确定的解释。定律和理论的建构及过程有着垂直的等级结构，其中蕴藏着不朽的科学思维与方法，与定律本身内容相比这些思维与方法更重要。

1 引言：物理学有自己的语言

自然语言中用语义的基本单元“词汇”来表示自然中的对象、状态或行为，然后按照一定的法则组成句子来表达一段意思，句子再通过逻辑组织起来形成文章完成完整叙述。物理语言也类似，它的语义基本单元是量化的方式来描述物体各种性质的物理量；而由这些物理量通过数学法则构成的方程，则表达了各种物理量之间的关系，反映出各种自然的法则，这就是物理定律；物理学家努力将物理定律再进一步统合成为物理理论，以期实现用简洁、完备、精确地语言描绘自然。伽利略说“宇宙永远是放在我们面前的一部伟大著作，哲学就写于其中。但是，如果不先掌握它的语言和符号，就不能理解它^[1]。”这里的哲学指自然哲学，而物理正是从其中脱胎而来。要通过物

理认识世界，自然也要先理解物理的“语法”。

2 物理定律的层次结构

社会语言学家伯恩斯坦曾将人类获得的知识分为水平知识结构(horizontal knowledge structure)和等级知识结构(hierarchical knowledge structure)，图1展示了等级知识结构和水平知识结构的差异^[2]。

水平知识结构是线状的，而等级知识是层级状的如金字塔，它所体现的知识由底层基础性的知识逐渐发展，知识经历整合的过程逐步抽象化和概括化。物理学及其定律的发现和发展的金字塔结构的最好体现，如人类从最初简单的总结太阳东升西落等天体现象，到提出“地心说”、“日心说”，再到牛顿等科学家建立的经典力学体系勾画出整个宇宙空间，实现了人类科学史上的第一次大综合；19世纪中叶，

麦克斯韦在库仑、奥斯特、安培和法拉第等人对电现象和磁现象研究的基础之上，建立了完整的电磁互联的电磁场理论，又把物理学引向了第

二次大综合；19世纪末，由物理学天空的“两朵乌云”导致的相对论和量子论同样有着类似的形成结构。由基础到尖端，由零散到综合，物理学定律正是呈现着这样垂直发展的层次结构。牛顿的《自然哲学之数学原理》便是这种基础定义到综合理论体系的“金字塔式”垂直结构的典型范例。牛顿从几个最基本的定义和公理出发，通过一步步数学推导和论证最终建立了一个逻辑自洽的经典力学体系(图2)。

杨振宁先生曾经将经典力学的发现和发展总结为1实验→2唯象定律→3理论架构→4微分方程四个阶段。在科学实验的基础上，通常先是发展出诸多唯象定律，在此基础上整合建构出统一的理论架构，牛顿力学、麦克斯韦方程组、爱因斯坦的狭义与广义相对论方程等物理学理论架构的骨干莫不如此。他们提炼了几个世纪的实验工作与唯象理论的精髓，用极度浓缩的数学语言写出了物理世界的基本结构，仿佛是造物者的诗篇。

3 物理理论的构建方法

物理理论建立的第一步是寻找物理量之间的关系，从而形成物理

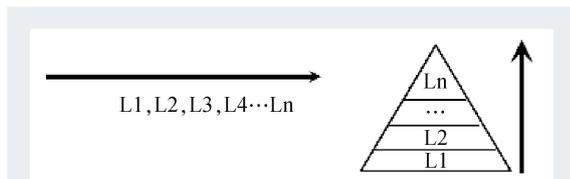


图1 水平知识结构和金字塔式等级知识结构图示

定律,进而对其进一步公理化形成理论。建立物理理论是一种创造性的脑力劳动,在这个过程中也遵循着“金字塔式”的垂直思维结构。

正如图3所示,建立理论需要有必要的基本物理概念作为基础,需要形象思维、抽象思维等的共同作用,最终使用文字、符号或数学语言把它描述出来。在这个过程中,观察和实验、归纳和演绎、假说与辩证等是必不可少的基本方法。

3.1 观察与实验

思维与惊奇始于观察。观察中主要以形象思维为主,但观察结果的归纳又要经历抽象思维过程。开普勒定律的建立就是形象思维与抽象思维和数学相结合的产物。开普勒为了完成构建理论宇宙学的目标需要第谷的天文数据,而第谷为了把自己的数据组织成有用的形式,需要开普勒的数学天分,他们走到一起才描绘了一幅较为科学的宇宙学图像。从开普勒定律的发现,我们认识到观察是科学进程的一种开端,但观察所得的事实并不等于对大自然的真正了解,基于观察产生的形象思维和抽象思维才会导致定律或理论的建立。这些定律和理论又引发新的观察和思考,人类就是这样行进在科学的大道上^[3]。

伽利略从实验中总结出自由落体定律、惯性定律和伽利略相对性原理等。他以系统的实验和观察推翻了纯属思辨传统的自然观,开创了以实验事实为根据并具有严密逻辑体系的近代科学,其工作为牛顿理论体系的建立奠定了基础。牛顿运动定律、法拉第电磁感应定律等许多唯象定律正是建立在实验基础之上的,而在归纳总结实验现象过程中需要抓住主要因素,忽略次要因素;需要透过纷繁复杂现象找出

共性,进行判断、推理并得出一般性的结论,即需要更多的抽象思维以抓住最本质特征。

3.2 归纳和演绎

归纳和演绎是科学研究的基本逻辑思维方法。马克思主义认识论认为,一切科学研究都必须运用到归纳和演绎的逻辑思维方法。

从18世纪末到19世纪中叶,不同领域的科学家从不同角度都提出过能量守恒的思想,引领着人们逐渐归纳建立了能量守恒的观念。1847年德国科学家亥姆霍兹从永动机不可能制成这一事实出发,考察了自然界不同的“力”(指能量)之间的相互关系,提出了“张力”(即势能)与“活力”(即动能)的转化,同时分析了在电磁现象和生物机体中能量的守恒问题,建立了普适的能的转化与守恒定律。这一发现是科学史上的重大事件,恩格斯把它与细胞学说、生物进化论一起列为19世纪的三大发现。它是自然科学长期发展和进步的结果,是普遍和谐可靠的自然规律之一。

再如麦克斯韦方程组是建立在静电场和磁场的几个定理或定律的基础之上的。这些定律是在不同的实验条件下得到的,他们的适用范围各不相同。为了获得普遍形式下相互协调一致的电磁

规律,麦克斯韦根据当时的实验资料和分析,系统地考察了这些定律,进行整合。他把已有的电磁规律用几个方程式表达出来以后,发现其中有矛盾,只有加上他称之为“位移电流” $\frac{\partial \phi_D}{\partial t}$ 的一项,方程式才是彼此相容的^[4]。麦克斯韦方程组以一种近乎完美的方式统一了电和磁,这是物理学家在统一之路上的巨大进步。它极尽优美,并且描述了经典电磁学的一切。它是理论分析、归纳综合的产物。

演绎是科学研究的重要环节。它不仅可以使人们的原有知识得到扩展和深化,而且能够得出科学预见,为新的科学发现提供启示性的线索,使科学研究沿着正确方向前进。麦克斯韦从电磁场理论出发进行推理,预言了电磁波的存在,并预言光是一种电磁波;门捷列夫根据他的元素周期律进行演绎推理,

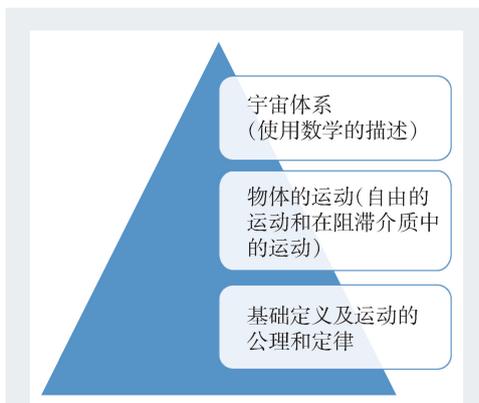


图2 牛顿在《自然哲学之数学原理》一书建立了金字塔式力学公理化体系

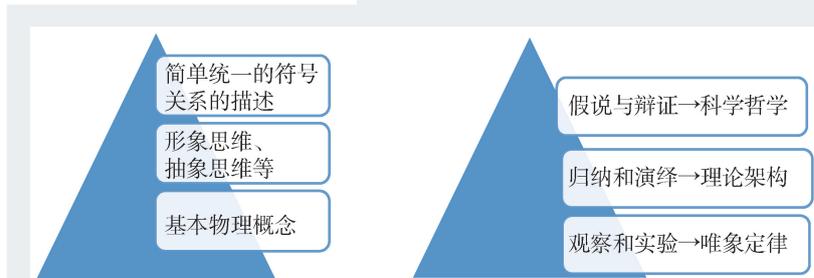


图3 建立物理定律“金字塔式”的思维结构和科学方法

不仅预见到镓、铊等当时尚未发现的新元素的存在,而且预先确定了这些新元素的性质,并先后都得到了科学的证实。物理学定律的建立从特殊到一般离不了归纳和直觉,但从一般到特殊一定是逻辑的。

3.3 假说的作用

假说是许多物理学家工作的出发点,它常常来源于直觉和顿悟。亨利·庞加莱(Henri Poincaré)曾把顿悟叫做 Sudden Inspiration,他说是 unconscious work 的结果。杨振宁先生曾说:“一方面直觉非常重要,可是另一方面又要能及时吸取新的观念,修正自己的直觉”^[5]。

提出假说主要依赖于类比、臻美和理想化等思维。薛定谔建立波动力学时的主要思想来源于经典力学和几何光学的类比,通过类比将经典力学中的一些规律移植到微观体系中,提出“量子力学是本征值问题”这一假说,经一系列的数学推导得到了符合实验事实的结果,总结了波动力学的主要规律。安培

的分子电流假说、麦克斯韦关于感生电场的假说等有力地促进了电与磁的统一,这些假说的提出源于他们对自然趋于统一和臻美的信仰。法拉第没有很好的数学功底,但他是一位具有深刻直觉能力的实验物理学家,他不用任何数学公式,凭直觉的可靠性创造出“力线”和“场”的概念,把抽象地“场”形象地描绘出来,是理想化方法的应用。

科学假说是科学性 with 推测性的对立与统一。这种对立统一的转化条件在于实践,科学实验是检验假说的唯一客观标准。“以太假说”曾经占据人们思想较长一段时间,但迈克尔逊—莫雷实验的结果却证实了“以太”的不存在,于是催生了新的假说“光速不变原理”,后被实验证实正确,并在此基础上建立了狭义相对论;而当“光线偏折”、“引力红移”、“引力波”等预言一一被证实时,我们可以说广义相对论比牛顿理论更加准确地描述了已知世界。

4 结语

物理定律和物理理论是对大自然的近似,其近似程度在今天或许是充分的,也可能随着实验方法的进步会变得不充分,为了可以更接近真实地描述事实,后人需要不断地润色和修正它们。然而,正如一种语言的语法不会急剧变化一样,物理学的基本逻辑和方法不会随实验发现和新理论的急剧进步而发生根本的变化,掌握它们才是掌握了物理学的关键所在。

参考文献

- [1] 熊辉. 哲学进展, 2013, 2: 21
- [2] 于晖, 于婷婷. 北京科技大学学报(社会科学版), 2017, 33(2): 1
- [3] 赵凯华, 张维善. 新概念高中物理读本. 北京: 人民教育出版社, 2006. p. 100—103
- [4] 赵凯华, 陈熙谋. 新概念物理教程 电磁学. 北京: 高等教育出版社, 2003. p. 404
- [5] 杨振宁. 我的学习与研究经历. 见 岁月留痕—《物理》四十年集萃. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012. p. 461—473

新书推荐

内容简介: 本书是朗道-栗弗席兹十卷本名著《理论物理学教程》的第八卷,也是该教程中朗道生前参与撰写的最后一卷。系统阐述了连续介质的电磁场理论以及物质宏观电学和磁学性质的理论。内容包括导体和介电体的静电学、恒定电流、静磁场、铁磁性 with 反铁磁性、超导电性、准静态电磁场、磁流体动力学、介质内的电磁波及其传播规律、空间色散、非线性光学等。可作为理论物理专业的研究生和高年级本科生教学参考书,也可供科研人员和教师参考。

推荐理由: 这是一本不寻常的电动力学书,不仅许多内容在一般的电动力学书中找不到,更重要的是它对许多问题的阐述相当深刻,发人深思。随着本卷的出版,高等教育出版社2006年开始的从俄文版翻译全套十卷《理论物理学教程》的宏伟计划终告完成,亦不辜负郝柏林院士生前于2008年9月在《物理》发表的“朗道百年”中说过的:“最近高等教育出版社着手组织,从俄文原著全套重新翻译出版。希望这件能促进我国理论物理教育事业的好事能善始善终”的嘱托。

读者和编者

