

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8874.2011.S0.013

## 《理论物理》课程教学初探

刘永录

(国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

**【摘要】** 通过分析理论物理课程(主要是四大力学)的特点,探讨了理论物理教学中的一些思路和方法。本科阶段理论物理教学的目的主要是,在帮助学生掌握课程基本内容的基础上,重点是使其把握课程的基本思想和基本技能,着重培养学生的自学能力,从而为下一阶段的学习打下较为坚实的基础。因此在理论物理教学中,要注重培养学生的抽象思维能力和逻辑推导能力。该论文强调在对物理本质进行把握和理解的过程中使用抽象思维的形式,并通过训练能够熟练的提取所关心物理力学体系的动力学信息。

**【关键词】** 理论物理;抽象思维;形象思维;数学

**【中图分类号】** G642 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1672-8874(2011)S0-0040-03

### An Investigation of the Teaching of Theoretical Physics

LIU Yong-lu

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Some methods and ideas are discussed from the point of the teacher by analyzing the main characteristics of theoretical physics (mainly on classical dynamics, electrodynamics, statistic dynamics, and quantum mechanics). The main aim of the undergraduate course is to help the students learn the basic knowledge of the course, as well as grasp the main idea and master the necessary skills. The emphasis is laid on the cultivation of the students' ability to study independently so as to prepare for further studies. This paper emphasizes the logical thinking while learning theoretical physics in order to grasp the intrinsic characteristics of physics. The detailed dynamical information of the physical system can be skillfully extracted after training.

**Key words:** theoretical physics; logical thinking; imaginary thinking; mathematics

#### 一、引言

本文的目的在于探讨理论物理课程的特点及教学中的思路和方法。我们知道,教学的目的是通过授课者的讲授、引导、释疑等环节使得学习者在系统而熟练地掌握本门课程基本内容的基础上,能够把握本门课程的基本思想,基本技能或者技巧,最终能够对本门课程的特点和思维模式有比较深入的认识和理解,从而形成较强的自我学习能力和知识再生能力。我们认为,在以上所说的教学内容中,核心是对课程基本思想和基本思维模式的认识与理解,方式是通过示范引导学习者自主学习,目的是掌握课程的思维特点,提高学生的自我学习能力。因此,深刻剖析课程的特点及学习规律就成为教师需要了解的首要任务。

目前,随着多媒体技术和互联网技术的迅猛发展,传统教学手段也受到了巨大的冲击。一方面,授课手段的丰富使得大量课程的讲授变得内容丰富,形式多样。另一方面,教学评价体制的改革在为课程建设提供了可以量化的

标准,从而推动教学进步的同时,这些要求对有些课程则并不完全适用。比如物理教学中,多媒体教学在大学物理<sup>[1]</sup>、大学物理实验、甚至有些专业基础物理课程中的成功使得大家普遍认为,通过幻灯片、动画等手段可以具体而形象地把物理图象展示给学生。因此要求教员在授课中“幻灯片与板书结合、物理图像要清晰、要联系实际应用”。然而,随着科学的发展,现代物理学、尤其是理论物理学部分,其物理内容的抽象性已经远远超出了经典物理的范畴,许多概念和物理图像已经不是靠形象思维所能够把握了,而在现代理论物理学的研究当中最重要的一个特点就是数学工具的应用。比如现代理论物理学一个重要的思想就是对称性<sup>[2]</sup>。按照形象化的要求,我们可以描述一些几何对称性,甚至空间平移对称性,空间转动对称性,但是对于时空的平移对称性与转动对称性的形象化就会困难很多,甚至于出现概念上的混淆和错误,至于一些内禀的对称性就彻底不是动画可以做出来的了,而必须借助于数学工具或者说理论物理学独特思维模式即抽象思维的帮

**【收稿日期】** 2011-07-22

**【作者简介】** 刘永录(1978-),男,陕西蒲城人,国防科学技术大学理学院物理系讲师,博士,主要研究方向:粒子物理与场论。

助来进行把握。

因此,我们认为,课程讲授的形式,最终要根据课程本身的特点及学生的具体情况来进行规划,而不是机械地与纲领性、政策性的文件保持一致。本文中,我们就理论物理的一些特点及教学过程中面临的问题作一些初步的讨论,以期能够对以后的教学工作有所启迪。

## 二、理论物理课程的特点

理论物理学是在实践和实验基础上对物理现象和物理规律的一种高度抽象和概括的数学表述。以四大力学为例,比如说,分析力学是建立在牛顿力学运动规律基础之上的,以虚功原理(广义虚功原理,包括达朗贝尔原理)或者最小作用量原理,或者哈密顿原理为基本假设而建立起来的一套数学描述方式,其逻辑体系的严密性体现在可以利用数学公式的推导给出牛顿表述下的所有力学性质和运动学特征。分析力学中的最重要的两个基本函数,即拉格朗日函数和哈密顿函数的构造,是给出具体物理过程动力学信息的关键,是描述物理体系的特性函数,也是分析物理问题的具体物理实在。从某种意义上说,分析力学实际上是在一些基本物理假设基础上的一套数学规则。电动力学的建立更是体现了数学和物理的完美结合。经典电动力学是描述宏观电、磁运动规律及其相互作用规律的理論体系,从历史来看,其物理基础是库仑力公式,高斯定律,安培定律和法拉第电磁感应定律,在长期的发展和纷繁芜杂的电磁现象背后,怎样抽象和概括出形式简洁优美的数学表述曾经困惑了人们很长时间,直到麦克斯韦在法拉第电磁力线的基础上引进了场的概念,并总结了以上所说的四个基本规律,写出了高度概括的描述电磁现象的麦克斯韦方程组,再加上刻画电磁相互作用力的洛伦兹力公式,就构成了经典电动力学的基本物理框架。电动力学的优美性在于在麦克斯韦方程组的基础上,考虑具体的物理实在和物理过程,比如边界条件等,可以在实验之前给出物理结果的准确预言,并能更为准确和深刻地揭示出其物理本质。统计力学则是理论物理理论中简单性和自治性结合的最为完美的理论之一,它的基本框架基于两个基本假设:(1)等几率原理;(2)多体体系的宏观物理性质是其微观动力学特性的统计平均。统计力学功能的强大体现在只要给定足够精确的物理模型,就能够利用标准的程序给出符合物理实在的预言结果。而大量与现实不符合的结果事后都证明是物理模型的建立不够精确,而不是统计力学本身的问题。同样,统计物理学的基本框架也是表现为数学原理。相对上述三大力学来说,量子力学是初学者最为头疼的一门理论物理课程。量子力学是二十世纪物理学最重大的两个成果之一,它同样也是在实验基础上发展起来的,其反映和揭示的是微观世界运动规律。经过一百多年的发展,从理论框架上来看,量子力学已经是一套成熟的,完备而自治的理论体系了。从理论物理的角度来看,它的基础在于六条基本假设(也有说是五条,测量假设作为一个推论),考虑到现代物理学中量子场论和描述基本相互作用的规范场理论,目前所观测到的所有微观实验现象都符合量子力学给出的预言。量子力学学习中的困难根源于由于其描述远离宏观可见层次的微观实在,因此在我们看来其抽象性特别明显,而且由于微观物理规律的独特性,有些特征根本没有宏观上的对应,这就更使得初学者对其理论体系的把握显得困难。综合来看,理论物理的目的在于试图用尽可能少的物理原理或者说物理假设,给出一个自治的、能够涵盖尽可能广泛领域内物理现象和物理规律的数学描述方式,而这个理论框架一旦建立,就可以通过逻辑推理和

数学推导,给出具体问题的客观再现。这里需要强调的是,理论物理的来源和最终归宿点都应该以物理实验和物理事实为基础和判断标准。

可以说,以这四大力学<sup>[3]</sup>为基础的理论物理无一不是经过时间洗炼的人类智慧的精华,它们都是在实验基础上通过理论提炼、数学归纳、逻辑推理、理论预言、再到实践检验而成的高度概括、比较抽象的理论成果,其特点是基本的物理规律与严格的数学、逻辑推理的紧密结合。从历史发展的角度来看,无论是牛顿力学还是麦克斯韦电磁理论,不管是相对论还是量子力学,都是在已经具有大量实验事实的基础上经过严密的逻辑推理和借助先进的数学工具归纳而诞生的。然而其一旦生成,就具有了相对的独立性,也就是说,在此基础之上可以仅凭借逻辑推理与数学推导就可以独立地得到不依赖于实验的物理现象与理论预言,当然其正确性最终要通过实验检验,但是理论物理的诞生已经使得仅仅依靠实验来发现物理规律的研究特征发生了重大改变。当然需要强调的是,四大力学的划分并不是绝对的,它们之间的联系是非常紧密的,甚至很大程度上有交叉和重叠。比如说分析力学的拉格朗日表述和哈密顿表述是在牛顿力学的基础上对低速宏观力学规律的描述,然而其思想、方法很容易推广到物理学的其它领域,比如现在对量子力学,量子电动力学,规范场论(描述强相互作用的量子色动力学和描述电磁及弱相互作用的电弱统一规范场理论)。而统计力学不但在经典的牛顿运动物理学中可以申请,对于遵从量子力学规律的量子体系同样适用且实用,其应用的最基本单元反而是描述单粒子的物理模型。而电动力学则是现代量子力学发展中其能否在宏观层次适用的一个标准判据。可以说,以四大力学为基础的理论物理学是物理学发展中的巨大成就,它们有着与普通物理学所不同的特征,那就是高度概括、高度抽象的数学形式与来源于实验的物理规律的完美结合,有能够独立发展并给出符合物理是在的理论预言,是人类认识自然界物理规律的有效工具。引用程建春教授的话“理论物理与普通物理的主要区别不在于物理概念,而是理论物理更注重用数学方法表述物理概念,从基本原理出发,通过逻辑推理和数学推导,建立起整个物理学体系”<sup>[4]</sup>。

也正是由于理论物理的这一大特点,使得对它的学习和掌握需要学习特定的思维模式和经历不同的学习过程。那就是培养高度的逻辑抽象和推理能力,比较强的数学推导能力,对物理现象和物理本质的抽象把握能力,这和经典物理学的学习有着显著的不同。比如说,在考虑非相对论情况下低速机械运动问题时,我们可以建立形象的、直观的图像来帮助学生尽快的建立起物理框架,我们可以借助于弹性球的碰撞来说明动量守恒能量守恒,这时候大部分同学也能体会到牛顿力学的简单直观的美学特点。与此对应,在分析力学中讲授拉格朗日表述与哈密顿表述的时候,大部分初学者的第一感觉是“干吗把简单问题复杂化”。而这两种分析力学的表述确实显得有些抽象且脱离实际。这时候,老师需要及时地将复杂数学背后的物理适时地讲授出来,并强调分析力学是一种数学表述形式,同时强调在普通物理中已经学习了、隐藏在数学形式后面的物理本质。比如在经典分析力学部分讲拉格朗日运动方程的时候,在物理的一边,可以强调物理基础是牛顿第二运动规律,在数学一方面,可以通过由达朗贝尔原理推导过程的演示给出拉格朗日方程,并解释由拉格朗日方程怎样得到牛顿运动方程,从而告诉学生拉格朗日函数作为力学体系的特性函数是怎么包含体系的力学信息,而我们又是怎样得到这些信息的,这样就可以初步建立通过抽象形式

把握物理规律的能力。再比如说,初学量子力学和相对论(狭义)的同学都会感到“太抽象”、“不理解”、“想象不出来”,诸如此类的感觉,这时候如果我们不是通过经典物理过渡和对应来学习,而是先介绍其数学形式和物理假设,并通过数学上的演示给出演化规律,再介绍其物理解释,这样反倒更容易入手。那么反之,我们能不能通过幻灯片或者动画来将拉格朗日方程形象化或者告诉学生光速不变原理呢?或者说从日常生活经验中找个例子在学生头脑中建立起电子自旋的图像呢?我们认为,以这种思路进行理论物理课程的教学无异于胶柱鼓瑟,缘木求鱼。而如果借助于数学工具,从理论物理的角度讲授,则学生更容易体会和把握这些课程的主要思想,更重要的事,有利于后续课程的学习和自学能力的培养。

### 三、理论物理学的教学任务

基于理论物理学的以上特点,它的教学目的和教学规律也应该有相应特征。总体来说,我们的任务应该是着重培养学习者的思维抽象能力,逻辑推理能力及数学应用能力。当一门或者说几门理论物理课程学习完成以后,我们的学生应该有这样的素质:当他看到给定系统的拉格朗日量或者哈密顿量时,他可以熟练地通过拉格朗日方程或者哈密顿方程得到他所关心的运动方程,状态方程,并能从得到的方程中抽取所感兴趣的物理规律。此时,他所感觉到的就不再是抽象,而是形象,我们认为这就是学习理论物理课程者需要培养的素质。

那么怎么才能做到这一点呢?我们认为,这一素质的培养是长期的、复杂的、没有灵丹妙药可以使之蹴而就的,然而在教学中则可以有所体现。那就是,立足于理论物理学的特点,帮助学习者将数学和物理从概念上分开,同时将理论物理研究和学习的思维形式尽可能全面的介绍给学生,并通过一定量的练习使得学生能够比较熟练的掌握理论物理研究的技巧和基本思路。在教学形式上,不能拘泥于必须建立起“形象化、具体化”物理图象的要求;注重逻辑推理和数学推导过程对思维能力的培养。不要一定试图使用幻灯片或者所谓的动画来演示所有的物理,如果不能使学生最终建立起抽象的物理图象体系,那么对后续的研究和学习都是有百害而无一利的,甚至会出现概念上的混淆。比如对于光的物理本性的理解和学习,爱因斯坦给出了“波粒二象性”的解释,然而深究一下,在形象化地解释中如果考虑其波动性,就会用经典波的对应来进行,而强调其粒子性,则会自觉不自觉地用质点的运动来对其粒子性进行说明,即使考虑到光量子的几率波解释而做出动画,本身就已经陷入使用经典的形象来描述量子世界的规律的窠臼中了,这很难使学生建立起正确的物理图象。

再比如说量子力学的学习,初学者普遍的反映就是“难,抽象”,作者在开始学习的时候也是同样的感受。抛开关于量子力学在哲学层次上的争论,事实上,量子力学基本理论本身在四大力学里面,即使不是最简单的,也肯定不是最难的,我们之所以感觉难,是难在其物理图象与我们现实经验的规律、特征有重大区别。不考虑量子力学建立过程中的艰辛,作为后来者学习的过程来看,如果具有了理论物理学的必要素质,在给定的基本假设和力学框架下,量子力学的推导和解释都是很自然和明白的。当然,由于初学者对微观规律的认识不像其它几门理论物理课程已经有了一定的物理基础,这就要求在讲授的时候对物理和数学作出更为明确的区分。进一步举例,在研究基本相互作用理论时用到了量子场论,其基础和出发点是量子力学<sup>[5,6]</sup>,而基本方法则是构造体系的拉格朗日量,物理上

真正需要做的只是满足不同对称性的规范场的选择,至于后续的推导和物理的给出都是可以从经典理论物理中找到答案<sup>[7,8]</sup>。通过一系列标准的操作,我们可以得到薛定谔方程,狄拉克方程等非常具体的物理实在。这里面的物理就在于对称性的选择,而这种对称性则完全是没有经典对应的内禀对称性,这是需要靠物理或者说实验来进行验证的。作者的体会是,形象和抽象是相对的,在对量子力学基本概念和基本规律掌握的过程中,通过理论物理学方法,一些物理图象和物理情景自然而然的就建立起来了。当然,需要指出的是,目前量子力学理论体系仍然不是我们所追求的最终形式,而我们所建立的物理图象也不是世界本来面目的完全再现,其必然会随着认识的深入而不断深化。

### 四、结论

我们的观点概括为以下几点:

(一)理论物理来源于实践,最终归宿仍然要回到实践,实验基础是理论物理的出发点、落脚点和唯一检验标准。

(二)理论物理一旦形成,就具有了相对的独立性,可以通过逻辑推理、数学推导独立给出物理现象和物理实在的科学预言。

(三)理论物理课程的特点在于数学形式的高度抽象性和概括性,推导过程的逻辑性和严密性。因此在讲授过程中应该结合课程内容的学习,理清数学形式和物理内涵的关系,通过培养学生的抽象思维能力和逻辑推理能力,最终帮助初学者形成一定的自学能力和知识再生能力。

(四)在理论物理教学中,强调正确理解物理本质的思维方式和思维习惯,并通过公式推导和演绎,培养学生通过抽象思维把握物理本质的能力,从而不断提高其理论物理修养。

最后谈一点个人体会。可以说,从麦克斯韦到爱因斯坦再到杨振宁,他们对于物理学的认识都不是建立在简单的图象基础上的,不管是麦克斯韦方程组还是爱因斯坦方程,或者是杨-米尔斯规范场理论,每一个理论物理学家从中看到的不仅是理论背后的物理现象、物理结果、物理本质,更重要的是一种广泛意义上的美,从主观上看,这种美和文学、绘画、音乐带给我们的美学享受是等价的。同时,也和这些艺术形式类似,对理论物理学美的欣赏也需要长时间的修养和沉淀。从这个意义上说,理论物理除了科学所要求的客观性外,还包含了理论物理学家的主观审美倾向,理论物理学家是物理学家中的理想主义者。

所以我们说,理论物理是一种素质,是一种修养。

### 【参考文献】

- [1] 李承祖,等.大学物理学[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 杨振宁,等.科学的品质[M].西安:陕西师范大学出版社,2003:1-17.
- [3] 田成林,等.经典理论物理导论[z].国防科技大学讲义.
- [4] 程建春.理论物理导论[M].北京:科学出版社,2007:80-491.
- [5] 曾谨言.量子力学(第三版)[M].北京:科学出版社,2000.
- [6] 周世勋.量子力学[M].北京:高等教育出版社,1979.
- [7] E. Leader and E. Predazzi, An introduction to Gauge Theories and Modern Particle Physics (Vol.2) [M].北京:世界图书出版公司,2010:97-127.
- [8] W. Greiner and B. Muller, Gauge Theory of Weak Interactions (Third Edition) [M].北京:世界图书出版公司,2003:107-175.