



全国高协组织教材研究与编写委员会审定

现代物理 XIANDAIWULI 与 中学物理 ZHONGXUEWULI

王国良

中国科学文化出版社

本书由全国高协组织教育发展中心、香港教科文出版有限公司资助出版
全国高协组织教材研究与编写委员会审定

现代物理与中学物理

王国良

中国科学文化出版社

内 容 简 介

本书既不同于一般的现代物理,也不同于通常的中学物理,它突出的特点是两者的密切有机结合。即用现代物理中的新观念、新思想、新结论去探讨中学物理中的有关问题。构成现代物理的是三大部门:狭义相对论、广义相对论和量子论。本书重点放在这三大理论同中学物理的有机结合。在现代物理中,对称性观念 and 对称性方法是现代物理学中既基本又深刻的观点,富有成果和生命力的科学方法,具有非常重要的地位。本书特别重视用对称性观点阐述中学物理的一些基本概念,用对称性方法解决中学物理的有关问题。

现代物理与中学物理

王国良

出版发行:中国科学文化出版社

排 版:新天地文印中心

印 刷:盛源印务有限公司

开 本:850mm × 1168mm 1/32

印 张:9.6

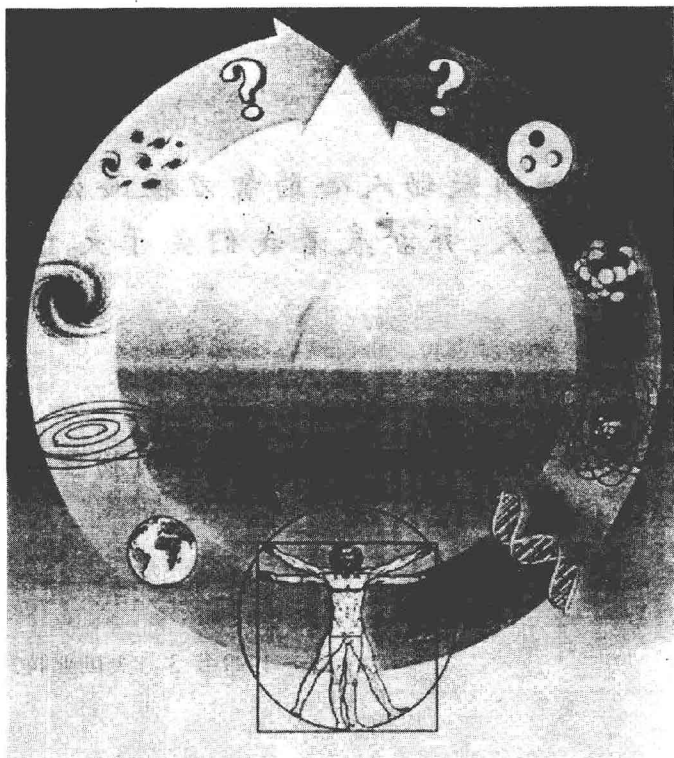
字 数:249 千字

版 次:2002年5月第1版

书 号:ISBN 962 - 8467 - 91 - 3

定 价:16.00 元

版权所有 翻印必究



我想知道这是为什么。
我想知道这是为什么。
我想知道
为什么我想知道这是为什么。
我想知道究竟为什么我非要知道
我为什么想知道这是为什么！

——理查德·费恩曼

物理学是一项激动人心的智力探险活动，它鼓舞着年轻人，并扩展着我们关于大自然知识的疆界。

——第 23 届国际纯粹物理和应用物理联合会 (IUPAP) 代表大会决议五

1999 年 3 月美国亚特兰大市

前 言

现代物理与中学物理是原国家教委为物理教育专业的硕士研究生课程班指定的一门必修课程。本书是在讲稿的基础上修改而成。

现代物理主要是相对论和量子论。2000年和2005年相继是量子论和相对论创立100周年。100年来,现代物理的理论得到了飞速的发展,其发展速度远远超过了以往任何时期。理论的发展极大地促进了现代科技的发展。正如江泽民主席2000年5月在接受美国《科学》杂志专访时强调指出的:“可以说,如果没有量子理论,就不会有微电子技术。如果没有相对论,就没有原子弹,也不会有核电站。”

相对论和量子论为我们揭示了高速领域和微观领域中特有的许多新奇现象,什么时间变慢,长度变短,弯曲时空,宇宙有限而无界,时间有开端,电子是波,光子看不见,微观粒子的运动没有轨道以及薛定谔那只半死半活的猫等等。现代物理学深刻地改变了人们关于时间、空间、物质和运动的观念,这些观念都非常地奇妙、不可思议,不能不使人产生一种神秘感,激励着人们去探索,去研究。应该说,现代物理是一种非常具有魅力的理论。深刻理解现代物理,对树立正确的辩证唯物主义世界观有着独特的作用。

中学物理属于基础教育课程,近年来也有了很大的改观,现代物理学的有关内容也开始出现在中学课本之中。这是实现中学物理教学内容现代化的必然,是教学内容改革的新成果。在教育部制定的全日制普通高级中学《物理教学大纲》(试验修订版)中也明确指出:“教学内容应当随着时代而有所更新。要处理好经典物理与近代物理的关系,适当增加近代物理的内容,并在经典物理知识的教学中注意渗透近代物理的观点,开阔学生的思路和眼界。”

实现大纲的目标,并非是一件容易的事情。现代物理毕竟是一

种高深难懂的理论。不是有人传说当年全世界只有 12 个半人真正懂得相对论吗。量子论似乎比相对论更难理解。著名理论物理学家诺贝尔奖获得者费因曼指出：“我能保证地说，没有人理解量子力学。”^①《寻找薛定谔的猫》一书的作者认为：“量子理论代表着科学的最大进展，比相对论具有更大意义，更直接更实用。而且能产生许多奇特的预言。量子力学世界是那么神奇，实际上连爱因斯坦也发现其难以理解，而拒绝接受由薛定谔及其同事创立的理论结果。……薛定谔也像爱因斯坦那样，被量子力学结果弄得心神不定……”^②本书力求在现代物理与中学物理之间架起一座桥，以便将现代物理中的一些新观念、新思想、新结论“翻译”成中学物理的语言，使之有机地融到中学物理课程之中，达到提高中学物理的知识品位之目的。

例如，力的概念和牛顿第二定律属于经典力学，是中学物理的必修内容。为启发学生的思维，激起学习的兴趣，不妨在选修课上适当介绍一下现代物理中力的概念。牛顿力学认为力是产生加速度的原因。而在相对论力学中，认为力是产生动量变化率的原因，使力的概念发生了许多根本的改变。首先是力的方向。按照相对论的观点，力的方向应是动量对时间变化率的方向，一般并不等于加速度的方向，可以证明，力与加速度间允许有小于 90° 的夹角。而广义相对论则进一步扩展了狭义相对论的结论，认为力和加速度方向间的夹角可以大于 90° ，甚至可以达到 180° ，这时力和加速度的方向完全相反。不管从牛顿力学的角度看是多么新奇，不可思议，却被雷达回波的延迟实验所证实。其次是力的作用效果。牛顿力学认为，力的作用仅仅是改变物体的运动速度，不改变物体的质量。而相对论力学则认

^① 转引自：周光召，回顾与展望——纪念量子论诞生 100 周年，物理，2001 年 5 月，第 30 卷，第 5 期。

^② (英)约翰·R·格利宾著，张广才等译，寻找薛定谔的猫，海南出版社，2001 年，5.6 页。

为,力不仅能改变物体的运动速度,还能改变物体的质量。在量子论中,力的概念就不那么管用了,出现了许多无法用力进行解释的奇特现象。由此可见,采用现代物理的观点讲授经典的内容,会使经典的内容发生许多根本的变化,变得更加丰富多彩,充满新奇性和趣味性。这对于开阔学生眼界,活跃思想,培养学生的创造性思维能力是大有好处的。

对称性是现代物理学中一个既基本又深刻的观念。在当代自然科学语言中,很少有象“对称”这样古老而又时新的概念,也难有象对称性方法这样既古老而又精确的科学方法。本书特别重视将对称性观念有机地融入到物理学的各个方面。用对称性观点阐明物理定律,用对称性方法解决物理问题。这样做,就可以通过“对称性”在现代物理与中学物理之间架起一座桥梁。以一种全新的观点,阐述传统的物理内容,使旧貌换新颜,有利于实现中学物理教学内容的现代化。

本书的前身是《力学与相对论》,重点介绍狭义相对论、广义相对论与经典力学的有关问题,是学习广义相对论的入门参考书。这次增补了量子论、宇宙论以及现代物理与中学物理其它有关内容,从而形成了此书。

非常感谢“全国高协组织教材研究与编写委员会”的热心帮助,和“全国高协组织教育发展中心、香港教科文出版有限公司”的资助,促成了本书的出版。另外也非常感谢辽宁师范大学校系领导的关怀以及教务处冯伯森处长的大力支持,才使本书得以顺利出版。

作者 王国良
于 大连

目 录

| | |
|----------------------|----|
| 第一章 对称性 | 1 |
| § 1.1 物理学与对称性 | 2 |
| § 1.2 常见的对称性 | 5 |
| § 1.3 对称性与中学物理 | 9 |
| § 1.4 对称性解题法 | 13 |
| § 1.5 对称性与运动学 | 17 |
| 习题与思考题 | 23 |
| 第二章 电磁学与相对论 | 25 |
| § 2.1 库仑定律为什么是平方反比关系 | 25 |
| § 2.2 库仑定律的成立条件 | 29 |
| § 2.3 牛顿第三定律的成立条件 | 32 |
| § 2.4 磁现象的本质 | 35 |
| § 2.5 匀速运动电荷的磁场 | 38 |
| § 2.6 例题中的相对论 | 41 |
| § 2.7 电磁感应现象的本质 | 45 |
| 习题与思考题 | 50 |
| 第三章 相对运动与相对论 | 52 |
| ✓ § 3.1 相对与绝对 | 52 |
| § 3.2 相对运动与绝对运动 | 53 |
| ✓ § 3.3 光速的绝对性 | 58 |
| ✓ § 3.4 物理规律的绝对性 | 61 |
| ✓ § 3.5 同时的相对性 | 62 |
| ✓ § 3.6 时间变慢 | 66 |
| ✓ § 3.7 长度变短 | 69 |

| | | |
|------------------|------------------------|----------------|
| § 3.8 | 洛伦兹变换 | 74 |
| § 3.9 | 间隔和固有时 | 78 |
| | 习题与思考题 | 81 |
| 第四章 | 相对论力学 | 83 |
| ✓ § 4.1 | 加速度的相对性 | 84 |
| ✓ § 4.2 | 质量的相对性 | 86 |
| ✓ § 4.3 | 相对论质量的意义 | 88 |
| ✓ § 4.4 | 动力学方程 | 91 |
| ✓ § 4.5 | 对力的再认识 | 93 |
| § 4.6 | 质能关系 | 96 |
| ✓ § 4.7 | 力的相对性 | 99 |
| ✓ § 4.8 | 力矩的相对性 | 107 |
| | 习题与思考题 | 110 |
| 第五章 | 广义相对论的基本思想 | 112 |
| § 5.1 | 广义相对性原理 | 115 |
| § 5.2 | 等效原理 | 117 |
| § 5.3 | 引力质量与惯性质量 | 122 |
| § 5.4 | 等效原理在力学中的应用 | 127 |
| § 5.5 | 牛顿惯性系与局部惯性系 | 132 |
| § 5.6 | 惯性力与潮汐力 | 136 |
| § 5.7 | 参考系与坐标系 | 140 |
| | 习题与思考题 | 141 |
| 第六章 | 时间与空间 | 144 |
| ✓ § 6.1 | 转盘上的几何学 | 144 |
| ✓ § 6.2 | 弯曲空间 | 149 |
| § 6.3 | 空间的内在性质 | 153 |
| § 6.4 | 引力场中的尺和距离元 | 155 |
| § 6.5 | 曲线坐标与度规张量 | 157 |

目 录

| | | |
|----------|--------------------|-----|
| ✓ § 6.6 | 转盘上的运动钟 | 162 |
| ✓ § 6.7 | 引力场中的运动钟 | 166 |
| ✓ § 6.8 | 全球卫星定位系统 | 168 |
| ✓ § 6.9 | 引力场中的 A—B 效应 | 172 |
| § 6.10 | 弯曲的四维时空 | 175 |
| § 6.11 | 坐标的意义 | 178 |
| § 6.12 | 引力场中的光速 | 183 |
| § 6.13 | 引力场中的同时性 | 186 |
| | 习题与思考题 | 190 |
| 第七章 | 引力场对力学规律的影响 | 193 |
| § 7.1 | 光子的运动方程 | 193 |
| ✓ § 7.2 | 雷达回波延迟 | 196 |
| ✓ § 7.3 | 引力场中的质量 | 200 |
| § 7.4 | 重力与加速度的方向关系 | 204 |
| § 7.5 | 涡度力与引力波 | 209 |
| § 7.6 | 爱因斯坦惯性定律 | 214 |
| § 7.7 | 引力的动力学方程 | 217 |
| § 7.8 | 爱因斯坦引力定律 | 219 |
| § 7.9 | 光线的偏折 | 223 |
| ✓ § 7.10 | 广义相对论与中学物理 | 229 |
| § 7.11 | 史瓦西场中的运动方程 | 234 |
| § 7.12 | 速度与加速度 | 237 |
| ✓ § 7.13 | 水星近日点的旋进 | 240 |
| | 习题与思考题 | 247 |
| 第八章 | 宇宙论 | 249 |
| § 8.1 | 宇宙学原理 | 249 |
| § 8.2 | 宇宙模型 | 251 |
| § 8.3 | 宇观运动 | 254 |

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| § 8.4 | 宇观运动的动力学 | 258 |
| § 8.5 | 宇观运动的运动学 | 262 |
| § 8.6 | 宇宙论与中学物理 | 268 |
| | 习题与思考题 | 273 |
| 第九章 | 量子物理简介 | 275 |
| § 9.1 | 光的波粒二象性 | 275 |
| § 9.2 | 德布罗意波 | 278 |
| § 9.3 | 微观运动 | 280 |
| § 9.4 | 一维无限深势阱中的粒子 | 286 |
| § 9.5 | 不确定关系 | 291 |
| | 习题与思考题 | 294 |

第一章 对称性

“告诉我,为什么对称是重要的?”毛泽东主席问道。^{李政道}

那是1974年5月30日,中国还在“文化大革命”的动乱之中,“四人帮”仍处于其权力的巅峰。当时,我特别沮丧地发现,在这文明古国,教育几乎完全停止。我非常希望有一种办法能改善这种状况。

那天早上6点钟左右,在北京饭店,我房间里的电话铃出人意外地响了起来。有人通知我,毛泽东想在一小时内在他中南海里的住所见我。尤其使我惊奇的是,在他见到我时他了解的第一件事情竟是物理学中的对称性。

按照韦氏字典的注释,Symmetry的意思是“均衡比例”,或“由这种均衡比例产生的形状美”。在汉语中,Symmetry的意思是“对称”,这个词带有几乎完全相同的含义。因此,这实质上是一种静止的概念。按照毛泽东的观点,人类社会的整个进化过程是基于“动力学”变化的。动力学,而不是静力学,是唯一重要的因素。毛泽东坚持认为,这在自然界也一定是对的。因而,他完全不能理解,对称在物理学中会被捧到如此高的地位。

在我们会见时,我是唯一的客人。在我们的椅子之间有一张小桌子,上面有本子、铅笔和常用来待客的绿茶。我把一支铅笔放在本子上,再使本子倾斜朝向毛泽东,然后又朝向我。这支铅笔就在本子上来回滚动。我指出,尽管没有一个瞬时是静止的,然而整体而言,这个动力学过程也有对称性。对称这个概念决不是静止的,它要比其通常的含义普遍得多,而且适用于一切自然现象,从宇宙的产生到每个微观的亚核反应过程。毛泽东赞赏这简单的演示。然后,他又

询问了有关对称的深刻含义以及其他物理专题的许多问题。他对过去没有时间学习科学表示遗憾,但他还记得 J. A. 汤姆孙的一些科学著作,他在年轻时很喜欢阅读这些书。

我们的谈话从自然现象逐渐转到人类活动。最后,毛泽东接受了我的一个小建议,即:至少对于优异青年学生的教育应该继续坚持并受到重视。由于周恩来的有力支持,这导致了“少年班”的开办,这个对于十几岁的优异学生采取特殊的强化教育的方案,首先在安徽的中国科技大学实施。由于它的成功,以后在中国的其他一些大学也相继开设了。

第二天在机场,我收到毛泽东主席的一件送别礼物:一套 J. A. 汤姆孙的 1922 年原版的四卷本《科学大纲》(The Outline of Science)。

对于由“文化大革命”引起的“大混乱”而言,这次会面只带来一点点“有序”。尽管如此,或许它以一种很有限的方式表示,在人所固有的在自然界寻求对称的渴望与他对社会的要求之间存在一种关联,二者同样是有意义的,而且也是均衡的。^①

——李政道

§ 1.1 物理学与对称性

什么是物理?物理学是研究物质存在形式、结构及其运动变化规律的科学。那么物理学所揭示的规律是什么呢?现代的物理学家已将大千世界的种种物理现象,归纳为一些基本定律。这些基本定律可以用一般的文学语言来表述,也可用精确的数学语言来表述。用数学语言表示的基本定律,称为基本方程。《中国现代科学家传记》“杨振宁”一文的作者指出:“300 年来共有 9 组这种基本方程:牛顿的运动与引力方程;热力学第一与第二定律;麦克斯韦方程组;统

^① 李政道著,朱允伦译,《对称,不对称和粒子世界》,北京大学出版社,1992,序言。

计力学的基本方程;狭义相对论方程;广义相对论方程;量子力学方程;狄拉克方程和杨一米耳斯方程”。

这9组基本方程概括了目前人们所认识的全部物理规律。人们说,这9组基本方程是物理学中的精华。那么这精华中的精华又是什么呢?如果采用力的语言来表示,可将这9组基本方程概括为四种基本相互作用的产物。这四种基本相互作用,就是强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和万有引力相互作用。到目前为止,自然界中的种种物理现象均可用这四种基本相互作用加以解释。从9组基本方程到四种基本相互作用,表明人们对物理规律的掌握更加深入,对物理规律的理解更加深刻。然而,人们的认识是永无止境的。又进一步提出了,能否将四种基本相互作用概括为统一的一种基本相互作用,或者说四种基本相互作用的统一的本质是什么?虽然现代物理学还没有找到最后的答案,但种种迹象表明,对称性可能是四种基本相互作用的本源。用当代杰出物理学家杨振宁的话说,就是“对称性支配相互作用”。这样一来,对称性与物理学就紧密地联系在一起。

对称性是物质的状态和运动规律在对称变换(如镜面反射、转动等)下的性质,它已成为物理学中一个最普遍而深刻的观念。中国物理学家朱洪元教授指出:“对称性在物理学中有很重要的地位。可以证明,假使物理基本规律具有某种对称性,与之相应就有某种守恒定律。例如:物理基本规律在空间各处都一样,与之相应就有动量守恒定律;假使物理基本规律在任何时间都一样,与之相应就有能量守恒定律。假使物理规律的某种对称性是定域的,那么与之相应一定存在某种基本相互作用,目前已经通过实验严格检验的广义相对论、量子电动力学和电弱统一理论都来源于定域对称性。也就是说:万有引力相互作用、电磁相互作用和弱相互作用都来源于定域对称性。”^①

^① 中国大百科全书·物理学,中国大百科全书出版社。1987,13,(为简化起见。以后再引用本书时简称为“百科全书”,并略去出版社和出版时间)。

最初接触对称性可能会感到很生疏,很神秘,其实对称性最初就来源于生活。在生活中可以找到很多对称的例子:雄伟的天安门具有左右对称性;五角星具有旋转对称性,它的五个角对称分布在同一个圆周上;当我们照镜子时,人和镜中的象具有镜象对称。对称性在物理学中之所以具有非常重要的地位,是因为对称性与另外一些基本概念具有密不可分的联系。对称的东西在地位上是平等的,平权的。例如五角星的每个角在几何上是平等的,平权的,任何一个角都不比另外的角特殊。这种无特殊性又可叫全同性、不可分辨性。而全同性、不可分辨性又可导致不变性。当五角星在平面上转过 $\frac{1}{5}$ 个圆周角时,图形又回到了原来的位置,即图形具有旋转不变性。物理学上的不变性对应着守恒律。质量的不变性,就是质量守恒定律,能量的不变性就是能量守恒定律。可见对称性与平等、平权性,等价性,全同性,不可分辨性,统一性,不变性,守恒律等性质是同一内容的不同表现,不同说法。因此从对称性上来研究物理学是大有好处的。

对称与非对称是对立的统一,有对称也一定有对称的破坏。事实上正是如此,物理规律也并非都具有对称性。热量只能自发地从高温物体流向低温物体,不能反过来进行,揭示这种不对称的是一条著名的物理定律——热力学第二定律。1956年杨振宁、李政道所发现的弱相互作用中宇称不守恒,揭示了弱相互作用中镜像对称性的破坏。对称性显示物质世界的统一性;对称性的破坏则显示了它的多样性,并且是事物不断发展变化、变得丰富多彩的原因。中国物理学家周光召院士强调指出:“如同建筑和图案一样,只有对称而又不完全对称才构成美的建筑和图案。大自然正是这样的建筑师。”^①

我们研究物理学,就是要探索物理规律中所具有的基本对称而

^① 百科全书,297。

又不完全对称所构成的对称美、物理美。

§ 1.2 常见的对称性

“物理学是一项激动人心的智力探险活动”^① 人们在対大自然的探险活动中,总会有许多激动人心的发现。牛顿发现了力——这一解释自然现象的万能语言。一切自然现象都可以用力的语言获得解释,确实是激动人心的发现。然而,在近代物理中却出现了许多现象,无法用力的语言解释。例如:1959年由阿哈罗诺夫(Y. Aharonov)和玻姆(D. Bohm)所提出的 A—B 效应,以及 1984 年阿哈罗诺夫和卡谢(A. Casher)预言的 A—C 效应。力的语言失去了往日的光辉。

诺贝尔物理奖获得者斯蒂芬·温伯格在他的“终极理论之梦”一文中写到:“物理学在 20 世纪取得了令人惊讶的成功。它改变了我们对空间和时间、存在和认识的看法,也改变了我们描述自然的基本语言。在本世纪(20 世纪)行将结束之际,我们已拥有一个对宇宙的崭新看法。在这个新的宇宙观中,物质已失去了它原来的中心地位,取而代之的是自然界的对称性。引起这场思想革命的原动力,是探索自然界的终极规律——即对我们的问题——为什么世界是这个样子——的最终回答。”我们看到,对称性取代了力,已成为 20 世纪和 21 世纪我们描述自然的基本语言。对称性在物理学中上升到十分重要的地位。正确地理解对称性,才能够深刻地理解当今的物理学。

为此,给出关于对称性的普遍而严格的定义:对一个事物进行一次变动或操作,如果经此操作后,该事物完全复原(不变性),则称该事物对所经历的操作是对称的,而该操作就叫对称操作。因此,事物、操作、不变性是理解对称性的三个关键词。下面具体介绍几种常

^① 这是 1999 年 3 月在美国亚特兰大市召开的第 23 届国际纯粹物理和应用物理联合会代表大会通过的决议中的一段话。