

前 言

作者在中国科学技术大学讲授普通物理力学多年,本书就是在授课讲义的基础上整理而成的。在成书的过程中,进行了修改和补充。

普通物理中的力学是比较难教的,凡是教授过这门课的老师,大都有此体会。一方面,力学的基本原理是整个物理学的重要基础,它包含许多基本的概念、方法和理论,需要学生极为准确地加以掌握,以备后继学习之用;另一方面,初入大学的学生,往往看轻力学,误认为新的内容不多,似乎在中学里都已学过,结果力学反而被疏忽了。

这种局面迫使一些教师采用教授理论力学的方法来教授普通物理力学。这样做,确实可以解决上述问题的第二个方面,学生不再感到“似曾相识”了。随着教和学二者的提高,原属理论力学的部分内容的确可以逐渐放到普通物理中来。但是,若仅限于通过这一途径改进教学,还不能完全解决问题的第一个方面——力学的基本原理是物理学的重要基础。

这个基础,是相对于物理学的当代发展以及前沿研究而言的。它至少应包含以下两个方面的内容:一是不断用新的、现代的观点去整理老的内容;二是不断用新的、前沿的研究成果来充实基础。比如相对论,它正是 20 世纪爱因斯坦对物理学中最基本的概念——时间和空间进行深刻分析后提出的。相对论的提出,对整个物理学产生了深远的影响。

我们的学生最终要走出学校,用所学的知识回报社会。对于他们,从学习物理学的第一天起,就教给他们学习、研究物理的点金之术,是十分必要的,这就是编写本教材的指导思想。具体地

说,有以下几点:

1. 强调实验的重要性,采用“归纳法”的教学方法

物理是一门实验科学,实验是检验物理理论的唯一标准。需要注意的是,有些物理学的结论不是来自理论,而是直接来自实验。例如,质量具有可加性,为什么?不是来自牛顿定律,而是来自实验。一个成功的实验必须至少具备两点:实验思路的简洁性与实验结果的可重复性。如何构造实验,以及在实验中只用最少的假定等,体现着对物理概念的深刻认识(或曰物理直观),是学习物理的难点,也是授课的难点和重点。本书采用以实验为主的教学方法(有人称之为“归纳法”),使各物理概念的引入尽可能自然和顺理成章。用这种“归纳法”的教学方法,培养出来的学生有较强的独立思考能力和创造能力,易于很快进入科学发展的前沿。教学实践证明,用这种方法教学,学生思路活跃,讨论热烈,教学效果较好。

2. 物理理论不是独一无二的,穿插讲述一些关于自然的辩证法

有的中学教师把牛顿定律等当作金科玉律来教。必须纠正这种观念。物理理论不是独一无二的,牛顿定律只是到目前为止解释宏观低速运动比较好的理论。解释一类实验现象(有限个),完全可以用几种风马牛不相及的理论。例如,“永动机不可能”这条能量守恒定律以前用“人力有限”来解释(如果可以造出永动机,则可以不消耗任何东西而能得到无穷无尽的有用功,人力岂非无限?而人力是有限的,故永动机不可能),大气压强以前用“自然害怕真空”来解释(我们知道,活塞抽水机可以抽出矿井里的水,是利用了大气压强;而古代的解释是,如果向上提活塞时,水不跟着上升的话,则活塞和水之间就会出现真空,而“自然害怕真空”,所以水也就跟着活塞上升)。即使时至今日,不少学生还是认为像能量守

恒、动量守恒、角动量守恒这些守恒定律是牛顿定律的推论。可是在高速运动时,牛顿定律失效了,但为什么这些守恒定律依然正确?这是因为还有凌驾于牛顿定律之上的更高层次的定律(或法则),这就是对称性原理。能量守恒定律来自于时间的平移对称性,动量守恒定律来自于空间的平移对称性,而角动量守恒定律来自于空间的各向同性。这三个守恒定律在考虑宏观低速运动状态时又可以成功地导出牛顿的力学定律。

物理理论反映的是我们对客观世界的认识,不同的观点就会有不同的理论。比如,目前描述我们宇宙时空的理论就有三个:假定伽利略相对性原理的牛顿力学理论、假定狭义和广义相对性原理的爱因斯坦相对论以及时空对称性原理。我们当然可以用实验去证伪,而这三种理论在宏观低速运动状态下都与实验符合得极好。从另一方面看,物理实验还有其局限性,这表现为两点:其一是任何实验都是有误差的(比如,有人说,能量守恒定律并不正确,若太阳系每年自动产生 10^{-20} 尔格的能量,则由于它小于实验误差,不会与现今的任何实验矛盾);其二是近代物理的许多实验并不是直接的,而是间接的,同一实验可以有不同的解释。物理理论不是绝对真理,它们只是相对真理,理论的多样性并不是坏事,每个学生日后都有创建物理理论的可能。

3. 适当地为物理学研究前沿打开窗口和为后继课程安排接口

在适当的地方开一些通向物理学研究前沿的窗口和为后继课程安排接口,对开阔学生的眼界、启迪他们的思维、加深他们对本门课程的理解都有好处。如从惯性的起源、引力场中零质量的运动,引伸出惯性和引力的几何(或时空)性质,为广义相对论做铺垫。由引力与其他几种基本相互作用不同(没有斥力),而与引力对抗的是运动,微观粒子的运动又表现为热现象,引伸出引力与热现象可能是一对矛盾的统一体。在“振动和波”一章中讲到纵波的波速时,给出的声波的速度公式与实验结果有 20% 的误差,究其

原因,是空气的局部温度变化所致,这个开向后继课程《热学》的接口,使学生们极为震惊,因为在力学中摩擦力司空见惯,而摩擦力做的功变成了什么是从不考虑的。

4. 对数学知识的要求

本书对数学知识的要求是矢量代数和简单的微积分,并尽量避免繁琐的数学推导。转动参考系中的科里奥利加速度是比较难以讲述的,本书在引入了绝对微商和相对微商的概念后,发现教学效果很好,学生容易接受。

本书在出版过程中得到了许多同行的热情支持,周子舫教授审阅了全部书稿,并提出了宝贵意见,张泰永教授为本书的出版做了大量的工作,在此一并表示感谢。

出版一本有创意的教材是作者多年的夙愿,在本书的撰写过程中,作者深感要编写出一本易教易学、又富有创意的基础课教材是一件相当艰巨的工作。由于作者学识水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大教师和读者不吝指正。

杨维絃

2001年10月

于中国科学技术大学

目 录

前言	(I)
绪论	(1)
0.1 什么是物理学?	(1)
0.1.1 物理学以前称自然哲学	(1)
0.1.2 物理学是探讨物质结构、运动基本规律和 相互作用的科学	(1)
0.1.3 物理学的任务和目的	(2)
0.1.4 物理学的理论与实验,科学与技术	(4)
0.1.5 物理学的研究方法和科学态度	(5)
0.2 怎样学习物理学?	(7)
0.2.1 培养物理直观	(7)
0.2.2 了解各种理论的适用范围	(7)
0.2.3 做好习题	(7)
第 1 章 质点运动学	(8)
1.1 引言	(8)
1.1.1 力学的研究对象	(8)
1.1.2 时间、空间和牛顿力学的绝对量	(8)
1.1.3 宇宙的层次和数量级	(11)
1.2 质点和参考系	(15)
1.2.1 质点和参考系	(15)
1.2.2 轨迹和运动方程	(17)
1.3 速度与加速度的瞬时性	(19)
1.3.1 位移、路程与速度	(19)
1.3.2 加速度	(24)

1.4	直角坐标系中运动的描述	(26)
1.4.1	直线运动	(28)
1.4.2	曲线运动	(32)
1.5	自然坐标系中运动的描述	(36)
1.5.1	切向加速度和法向加速度	(37)
1.5.2	自然坐标系	(43)
1.5.3	圆周运动	(43)
1.6	平面极坐标系中运动的描述	(46)
1.6.1	平面极坐标系	(46)
1.6.2	位矢、速度和加速度的极坐标表示	(48)
1.7	相对运动	(51)
1.7.1	动参考系作任意方式的平动	(51)
1.7.2	动参考系作任意方式的运动	(53)
	思考题	(64)
	习题	(66)
第2章	质点动力学	(72)
2.1	牛顿运动定律	(74)
2.1.1	牛顿第一定律(惯性定律)	(74)
2.1.2	牛顿第二定律	(78)
2.1.3	牛顿第三定律(作用与反作用定律)	(86)
2.2	常见的力	(88)
2.2.1	弹性力	(88)
2.2.2	摩擦力	(88)
2.2.3	重力	(90)
2.2.4	万有引力	(90)
2.2.5	库仑力	(90)
2.2.6	分子力	(91)
2.2.7	核力	(91)
2.2.8	洛仑兹力	(92)

2.3	动力学问题的求解	(93)
2.4	力学相对性原理和伽利略变换	(104)
2.4.1	力学相对性原理	(104)
2.4.2	时间和空间的绝对性	(105)
2.4.3	伽利略变换	(106)
2.5	非惯性参考系和虚拟力	(107)
2.5.1	平动参考系	(108)
2.5.2	转动参考系	(113)
2.5.3	例题	(120)
2.5.4	牛顿绝对时空概念的困难和惯性的起源	(124)
	思考题	(128)
	习题	(130)
第3章	动量	(140)
3.1	动量守恒定律与动量定理	(141)
3.1.1	孤立体系与动量守恒定律	(141)
3.1.2	冲量与质点的动量定理	(144)
3.1.3	质点系动量定理	(144)
3.2	质心运动定理	(148)
3.2.1	质心运动定理	(148)
3.2.2	质心坐标系	(151)
3.3	变质量物体的运动	(155)
3.3.1	变质量体系	(155)
3.3.2	运动方程	(156)
	思考题	(160)
	习题	(161)
第4章	机械能守恒	(167)
4.1	能量守恒	(168)
4.1.1	永动机不可能	(168)
4.1.2	重力势能	(169)

4.1.3	动能	(172)
4.1.4	弹性势能和其他能量形式	(173)
4.2	动能定理	(175)
4.2.1	质点动能定理	(175)
4.2.2	功和功率	(177)
4.2.3	质点系动能定理	(179)
4.3	势能	(181)
4.3.1	有心力及其沿闭合路径做功	(181)
4.3.2	保守力与非保守力,势能	(182)
4.3.3	势能曲线	(185)
4.4	机械能守恒定律	(188)
4.4.1	质点系的功能原理和机械能守恒定律	(188)
4.4.2	保守系与时间反演不变性	(191)
4.4.3	两体问题	(192)
4.5	质心系	(197)
4.5.1	柯尼希定理	(197)
4.5.2	一般质心系中的功能原理和机械能守恒定律	(199)
4.6	碰撞	(203)
4.6.1	正碰	(205)
4.6.2	斜碰	(209)
4.6.3	质心坐标系	(210)
4.7	对称性、因果关系与守恒律	(217)
4.7.1	什么是对称性	(217)
4.7.2	因果关系和对称性原理	(219)
4.7.3	守恒律与对称性	(220)
	思考题	(222)
	习题	(223)
第5章	角动量定理	(229)

5.1	孤立体系的角动量守恒	(229)
5.1.1	单质点孤立体系和掠面速度	(229)
5.1.2	两个质点的孤立体系和角动量	(230)
5.2	质点系角动量定理	(233)
5.2.1	质点角动量定理	(233)
5.2.2	质点系角动量定理	(234)
5.2.3	角动量守恒定律与空间各向同性	(238)
5.3	质心系的角动量定理	(238)
5.3.1	质心系的角动量定理	(238)
5.3.2	体系的角动量与质心的角动量	(239)
5.4	万有引力	(240)
5.4.1	开普勒的行星运动三定律	(241)
5.4.2	牛顿的理论	(243)
5.4.3	引力的线性叠加性	(247)
5.5	关于万有引力的讨论	(252)
5.5.1	G 的测定	(252)
5.5.2	引力的几何性	(254)
5.5.3	逃逸速度	(255)
5.5.4	引力是什么	(256)
5.6	质点在有心力场中的运动	(262)
5.6.1	研究有心力问题的基本方程	(263)
5.6.2	有心力问题的定性处理,有效势能与轨道特征	(265)
5.6.3	有心力问题的定量处理和轨道问题	(268)
	思考题	(274)
	习题	(276)
第6章	刚体力学	(282)
6.1	刚体运动学	(284)
6.1.1	刚体的性质	(284)

6.1.2	刚体的几种特殊运动	(287)
6.1.3	刚体的一般运动	(288)
6.2	施于刚体的力系的简化	(292)
6.2.1	作用在刚体上的力是滑移矢量	(293)
6.2.2	几种特殊力系	(293)
6.3	刚体的定轴转动	(296)
6.3.1	角动量与角速度的关系	(296)
6.3.2	定轴转动刚体的动量矩定理	(297)
6.3.3	转动定律	(298)
6.3.4	转动惯量	(299)
6.3.5	惯量张量和惯量主轴	(302)
6.3.6	定轴转动刚体的角动量守恒	(308)
6.3.7	约束反力与静、动平衡问题	(308)
6.4	刚体运动的基本方程与刚体的平衡	(311)
6.4.1	刚体运动的基本方程	(311)
6.4.2	刚体的平衡	(312)
6.5	刚体的平面平行运动	(314)
6.5.1	运动方程	(314)
6.5.2	纯滚动的运动学判据	(315)
6.5.3	瞬时转动中心	(316)
6.5.4	功能原理	(318)
6.5.5	解题注意事项	(319)
6.6	刚体的定点运动	(323)
6.6.1	没有外力矩的定点运动	(323)
6.6.2	陀螺的运动	(326)
	思考题	(330)
	习题	(331)
第7章	振动和波	(341)
7.1	简谐振动	(341)

7.1.1	平衡与振动	(341)
7.1.2	恢复力与弹性力	(342)
7.1.3	简谐振动的描述	(346)
7.1.4	谐振子的能量	(349)
7.1.5	振动的合成与分解	(350)
7.2	阻尼振动	(356)
7.2.1	运动方程及其解	(357)
7.2.2	欠阻尼振动	(358)
7.2.3	临界阻尼与过阻尼	(360)
7.3	受迫振动与共振	(361)
7.3.1	运动方程及其解	(362)
7.3.2	稳态解分析	(364)
7.3.3	共振($\omega = \omega_0$)	(366)
7.4	二自由度振动*	(371)
7.5	机械波	(373)
7.5.1	机械波的产生和传播	(374)
7.5.2	波的分类	(374)
7.5.3	平面简谐波	(377)
7.5.4	波动方程和波的传播速度	(380)
7.5.5	波的能量密度	(383)
7.6	波在空间中的传播	(387)
7.6.1	惠更斯原理	(387)
7.6.2	波的反射定律	(388)
7.6.3	波的折射定律	(389)
7.6.4	波的衍射	(390)
7.7	波的叠加	(391)
7.7.1	波的干涉	(391)
7.7.2	驻波	(393)
7.7.3	非相干波的叠加,波的群速度	(396)

7.8 多普勒效应	(399)
7.8.1 波源静止,观察者运动	(399)
7.8.2 波源运动,观察者静止	(400)
7.8.3 波源和观察者都运动	(401)
7.8.4 一般情况	(401)
7.8.5 马赫锥	(404)
7.9 非线性波简介	(405)
思考题	(408)
习题	(410)
第8章 相对论	(420)
8.1 牛顿时空观的困难	(421)
8.1.1 光传播的射击理论的困难	(421)
8.1.2 “以太”理论及其困难	(424)
8.2 相对性原理	(430)
8.3 洛仑兹变换	(434)
8.4 相对论时空观	(437)
8.4.1 时间间隔的相对性	(438)
8.4.2 同时的相对性	(441)
8.4.3 长度的相对性	(441)
8.4.4 时序的相对性和因果关系	(444)
8.4.5 时空间隔的绝对性	(446)
8.4.6 速度合成律	(447)
8.4.7 角度变换公式	(451)
8.4.8 加速度变换公式	(454)
8.5 狭义相对论力学	(459)
8.5.1 相对论动量和质量	(459)
8.5.2 相对论中的力	(462)
8.5.3 质能公式	(463)
8.6 狭义相对论中质量、动量和力的变换公式	(467)

8.6.1	质量的变换公式	(467)
8.6.2	动量和能量的变换公式	(468)
8.6.3	力的变换公式	(471)
8.7	四维时空	(473)
8.7.1	四维矢量	(473)
8.7.2	时空间隔	(476)
8.7.3	四维速度矢量	(477)
8.7.4	四维动量矢量	(478)
8.7.5	多普勒效应	(479)
8.7.6	孪生子佯谬	(481)
8.8	广义相对论简介	(487)
8.8.1	等效原理和广义相对性原理	(488)
8.8.2	光在引力场中的弯曲	(489)
8.8.3	引力时间延缓和引力红移	(490)
8.8.4	弯曲时空和水星的进动	(492)
	思考题	(494)
	习题	(496)
	习题答案	(502)

绪 论

0.1 什么是物理学？

0.1.1 物理学以前称自然哲学

古希腊人把所有对自然界的观察和思考笼统地包含在一门学问里，那就是自然哲学，科学分化为天文学、力学、物理学、化学、生物学、地质学等，只是最近几百年的事情。在牛顿的时代里，科学和哲学还没有完全分家。牛顿划时代的著作名为《自然哲学的数学原理》，就是一个明证。物理学最直接地关心自然界最基本的规律，所以牛顿把当时的物理学叫做自然哲学。

0.1.2 物理学是探讨物质结构、运动基本规律和相互作用的科学

尽管这个相当广泛的定义仍难以刻画出当代物理学极其丰富的内涵，不过有一点是肯定的，即与其他科学相比，物理学更着重于对物质世界普遍而基本的规律的追求。

物理学的兴起，是从经典力学开始的。在经典力学之前，人类的文明中虽然已有不少具有物理价值的发现和发明，但是并不存在一门独立的物理学。17世纪，牛顿在伽利略、开普勒等人工作的基础上，建立了完整的经典力学理论，这是现代意义下的物理学的开端。从18世纪到19世纪，在大量实验的基础上，卡诺、焦耳、开尔文、克劳修斯等建立了宏观的热力学理论，克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼等建立了说明热现象的气体分子动理论，库仑、奥斯

特、安培、法拉第、麦克斯韦等建立了电磁学理论。至此,经典物理学理论体系的大厦巍然耸立。然而,正当大功甫成之际,一系列与经典物理的预言极不相容的实验事实相继出现,人们发现大厦的基础动摇了。在这些新实验事实的基础上,20世纪初,爱因斯坦独自创立了相对论;先后在普朗克、爱因斯坦、玻尔、德布洛意、海森伯、薛定谔、玻恩等多人的努力下,创立了量子论和量子力学,奠定了近代物理学的理论基础。20世纪,随着科学的发展,从物理学中不断地分化出了诸如粒子物理、原子核物理、原子分子物理、凝聚态物理、激光物理、电子物理、等离子体物理等名目繁多的新分支,以及从物理学和其他学科的杂交中生长出来了诸如天体物理、地球物理、化学物理、生物物理等众多交叉学科。

0.1.3 物理学的任务和目的

物理学的任务和目的是:用一系列尽可能简明的概念和方程(定律),去统一概括物质的结构和运动的基本规律。

物理学依赖于一种基本的信念:物质世界存在着完整的因果链条,即自然界是统一的,牛顿力学则是体现这种信念的第一个成功的范例。

从牛顿力学的创建到现在,已经有三百多年了,物理学已经大大发展了,远远超过了经典力学原有的水平。但是,就物理学的最基本的追求和物理学的总目标来说,却一直没有变化。经典力学时代的追求和目标,可以说时至今日仍然是整个物理学的追求和目标。这个最基本的追求和目标,就是自然界的统一。的确,从整个物理学的发展中,可以看到一条鲜明的主线,这就是执着地追求宇宙的统一,找寻支配宇宙万物的最基本、最统一的规律。

相信存在统一,努力寻求统一,如果仅仅作为一种自然观,早在古代就已经有了。老子的《道德经》中写有:“道生一,一生二,二生三,三生万物。”这就是中国古代的一种统一观,它完全可以与爱因斯坦所提及的古希腊的哲学相媲美。不过,无论在古代中国还

是在古希腊,统一观都只是一种哲学思辨。

牛顿的力学和古代的哲学不同,它不是思辨地坚持统一观,而是发展了寻找统一的有效的物理方法。牛顿在他的最重要的力学著作《自然哲学的数学原理》中阐明了他所采用的方法。他在前言中写道:“我奉献这一作品,作为哲学的数学原理,因为哲学的全部责任似乎在于——从运动的现象去研究自然界中的力,然后从这些力去说明其他的现象。”这就是说,寻求统一的出发点不是思辨,而应是运动现象。自然界中的运动现象是多种多样的,物理学的责任就在于寻找支配这些现象的统一的力。

今天的物理学,仍然大体上沿袭着牛顿所开创的研究途径:寻找统一的力,或统一的相互作用。因此,几乎所有基本的物理理论都称作某种力学,如牛顿力学、电动力学、色动力学,等等。每一种新的力学的创立,都标志着我们在追求统一的征程上达到了一个新的水平。

牛顿的力学和万有引力定律,是物理学上第一次大的统一。在牛顿之前,传统的观念认为支配天体运行和支配地面物体运动的规律是不相同的,有所谓天界和世俗两个世界之分。然而,牛顿发现,天上行星和月球的运动,实际上和地面上的落体运动遵从相同的规律,它们都是由引力引起的。这样,牛顿就用他的力学打破了天界和世俗的界限,找到了两个世界的统一。牛顿称引力为万有引力,就是强调这种统一。

物理学上第二次大的统一,是由 19 世纪的麦克斯韦完成的。他建立了电磁理论,使电、磁和光学现象得到统一。这就是电动力学。人们很快发现,牛顿的力学和麦克斯韦的电磁学这两大领域在时空观上是很不协调的。在前者中,各种匀速运动是平权的,但却假定有绝对空间或绝对速度存在。相反,在后者中,有一个地位特殊的速度,即光速,但却始终测不出这个特殊的速度是相对于哪一个绝对空间而言的。爱因斯坦抛弃了绝对空间观念,使电磁学、力学在新的时空观的基础上达到了协调和统一。

爱因斯坦还曾企图把引力和电磁力二者统一起来,但他的努力没有成功。然而,他却找到了能与麦克斯韦电磁理论相协调的引力理论——广义相对论。

作为引力理论的广义相对论和作为电磁理论的麦克斯韦理论构成了我们今天称为经典物理学的理论基础。

与经典物理相对的是量子论。量子力学最初是作为原子、分子的统一的力学而发展起来的。这种新的力学统一地解释了原子、分子的各种光谱现象,统一地解释了元素周期表,统一地解释了各种分子的键合。

在将量子力学扩展到电磁场时,遇到了困难,这本质上是由于电磁场是相对论性的。直到 20 世纪 40 年代末,发展了所谓的重整化方法,才巧妙地解决了上述的困难,使量子论与电磁理论能得以统一,产生了量子电动力学。

0.1.4 物理学的理论与实验,科学与技术

物理学定律是很多(有限)个实验或现象的总结和概括,是相对真理,会不断被新的定律修正。

由物理学定律出发,经过合适的逻辑推演而得的结论,我们称之为“定理”。物理学的理论是物理学定律和定理的集合。自然科学各领域和工程技术都建立在物理学定理的基础上。

社会上习惯于把科学和技术联在一起,统称“科技”,实际上,二者既有密切联系,又有重要区别。科学解决理论问题,技术解决实际问题。科学要解决的问题,是发现自然界中确凿的事实和现象之间的关系,并建立理论把这些事实和关系联系起来;技术的任务则是把科学的成果应用到实际问题中去。科学主要是和未知的领域打交道,其进展,尤其是重大的突破,是难以预料的;技术是在相对成熟的领域内工作,可以作比较准确的规划。

物理学实验是物理学理论正确与否的仲裁者。物理学实验在物理学的发展中扮演着非常重要的角色。同学们在学习物理时,