

大学物理

COLLEGE PHYSICS

主编 杨宏菲 王国娟 张伟力

哈尔滨地图出版社

大学物理

DAXUE WULI

主编 杨宏菲 王国娟 张伟力

哈尔滨地图出版社

·哈尔滨·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/杨宏菲,王国娟,张伟力主编. —哈尔滨:
哈尔滨地图出版社, 2005. 11
ISBN 7-80717-180-4

I. 大… II. ①杨…②王…③张… III. 物理学
—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 130190 号

哈尔滨地图出版社出版、发行

(地址:哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮编:150086)

哈尔滨庆大印刷厂印刷

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:12.375 字数:286 千字

2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷

印数:1~500 定价:19.80 元

前 言

随着我国社会主义市场经济体制的建立和改革的不断深入,高等职业教育、高等专科教育、成人高等教育(以下简称高职高专)迅速发展,与之相适应的教材建设成为一项紧迫的任务。

本书可作为高职高专院校物理课程的试用教材或教学参考书。

本书在编写过程中,强调从实例引入问题,以问题为主线,对基本概念、公式、定理尽量详加解释,并通过大量的例子加以说明。编写的内容力求简洁易懂,突出实用性,在教学中可根据不同专业和学时多少在内容上有所取舍。充分考虑高职学生的物理基础,较好地处理了物理知识点之间的衔接,适度淡化逻辑论证,充分利用实例说明,帮助学生理解有关概念和理论。

本书共分 11 章,各章配有习题,书末附有习题答案与提示。

本教材由杨宏菲、王国娟、张伟力担任主编。参加编写工作的有:黑龙江农业工程职业学院杨宏菲(第三、四、六、八、九章);哈尔滨师范大学张伟力(第一、二、十一章);牡丹江大学王国娟(第五、七、十章)。全书框架由杨宏菲完成,二作、三作参加了审稿和定稿工作。

限于编者的水平,不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2005 年 11 月

目 录

第一章 物理学研究方法简介	1
第一节 实验在物理学进展中的地位	1
第二节 物理学中常用的思想方法	3
第三节 定性和半定量方法	7
第四节 物理学发现给人的启示	12
第五节 物理学的单位制和量纲	18
第二章 质点动力学	22
第一节 牛顿运动定律及其应用	22
第二节 动量	28
第三节 功和能	33
第三章 刚体的转动	46
第一节 刚体定轴转动的描述	46
第二节 转动定律	49
第三节 角动量守恒定律	53
第四章 机械振动和机械波	58
第一节 简谐振动	58
第二节 机械波	66
第三节 波的干涉与衍射	71
第五章 气体动理论	76
第一节 气体动理论的基本观点	76
第二节 理想气体的压强	77
第三节 理想气体温度公式	79
第四节 理想气体状态方程	83
第六章 静电场	86
第一节 库仑定律叠加原理	86
第二节 电场、电场强度	90
第三节 电场中的高斯定理	94
第四节 电场力的功、电势	100
第五节 静电场中的导体	105
第六节 电容、电容器	108
第七节 静电的应用与防护	110

第七章 直流电路	113
第一节 电功、电功率、焦耳定律	113
第二节 电源、电动势	116
第三节 三种形式的欧姆定律	118
第八章 稳恒磁场	127
第一节 磁场磁感应强度	127
第二节 毕奥—萨伐尔定律	130
第三节 磁场中的高斯定理	134
第四节 安培环路定理	136
第五节 磁场对运动电荷及载流导线的作用	138
第九章 电磁感应、电磁场	145
第一节 电磁感应定律	145
第二节 动生电动势与感生电动势	150
第三节 电磁场与电磁波	155
第十章 近代物理简介	158
第一节 狭义相对论简介	158
第二节 量子物理简介	167
第十一章 物理实验	172
实验一 用单摆测重力加速度	172
实验二 牛顿第二定律的验证	175
实验三 用惠斯登电桥测电阻	179
实验四 万用电表的初步使用	181
实验五 牛顿环	184
附录 算术平均误差的估算	187
习题答案	188
常用物理常量	192

第一章 物理学研究方法简介

了解物理学的研究方法,对于学好物理课有十分重要的意义。本章我们作一简单介绍,以便于学生掌握重点,提高学习效率。

第一节 实验在物理学进展中的地位

一、物理学是实验科学

物理学研究方法中,首先应当谈到的是物理实验,它的创始人是伽利略。什么叫实验?实验是根据预定的目标,精心选择实验仪器,控制实验条件,尽量减少干扰,以求对现象的发生、变化规律得出科学结论的一种实践活动。只有在正确设计、精心操作的基础上进行的实验,才具有认识论的意义。实验和一般的观测是有区别的。观测只是被动地等待自然现象发生和发展,人们仅仅对现象进行记录和研究,而实验却要求人们发挥主观能动性,控制条件,使现象可重复出现,以便对自然现象得出规律性的认识,或者从中发现新现象,或验证理论预言。举例来说,丹麦天文学家第谷对于星空,特别是行星的运动进行了长达20年的精心观测和记录,开普勒对这些观测数据进行了长达8年的潜心研究,总结出行星运动的三大定律,这是通过观测和研究得出重要科学结论的范例。但是,由此得出的引力定律的适用范围只能认为限于行星运动,如何证明它也适用于地球上和宇宙中的一切物体呢?还得借助于实验。1798年卡文迪许进行的扭秤实验,被公认为是万有引力定律直接的实验证据,由此测定的引力常数,消除了由天文观测推出的数值中的不确定因素。然而,观测和实验这两者的界限有时并不那么严格,那些有明确目标,有意识地选择适当的时间、地点、观测设备,而且对观测结果有一定估计的观测,也具备物理实验的某些特征,例如,验证广义相对论预言的那些观测。从这个意义上讲,整个宇宙实际上是一个超大规模的实验室,它提供了大尺度、大质量、高能量、超越生命极限的超长时间等地球上难以实现的实验条件。近代关于宇宙大爆炸和恒星演化、超强引力场中的物态及时空结构、引力波探测等重大课题,目前仍难以在地球上的实验室中进行研究。

地面实验室和太空实验室中的实验,以及近年来发展起来的计算机模拟实验,始终是物理实验的主体。伽利略的斜面实验和自由落体实验,为牛顿运动定律的建立奠定了基础;库仑扭秤实验和由此总结出的库仑定律,是静电学的基础之一,它标志着静电学开始成为真正的科学。奥斯特发现电流的磁效应,后来安培进行的电流产生磁场的实验研究,以及法拉第对电磁感应现象的研究,成为磁学的基础;托马斯·杨和菲涅耳进行的光的干涉和衍射实验,是波动光学的基础;卢瑟福的粒子散射实验,彻底否定了原子结构的汤姆

逊模型,成为原子核式结构模型的基础性实验,等等。这些例子无不体现了实验在物理学发展中所起的基础性作用。可以说,物理学的一切基本定律,都是实验规律,而不是思辨的产物,它们或者是实验的直接结果,或者是对大量实验现象进行抽象、提炼后总结出来,再由大量实验证实后才确定下来的。

二、实验的一般程序

实验首先要确定目标,并进行正确的设计,设计要确保原理的正确性和技术上的可行性,并对可能遇到的困难作出评估。例如,密立根的著名的油滴实验,目的是测量电子电量。在汤姆逊发现电子时,已用电磁联合偏转的办法测量了电子的荷质比,如果能单独测出电量,质量也可随之确定。其基本原理是,将油滴置于平行板电容器的两极板之间,极板两端加上高电压以产生一个匀强电场,使油滴带电,调节电压,可使油滴所受的电场力与其重力平衡,由此可确定油滴所带电量的绝对值。反复使油滴放电和重新带电,记录下每次所带电量的绝对值,可以发现,它们总是以一个最小电量的整数倍增加或减少的,这个电量的最小单位就是电子电量的绝对值(为了简单起见,我们略去了该实验的一些重要的细节)。我们大致地看一下,为了保证实验成功,密立根在实验设计方面所作的考虑:①油滴不能太小,否则会产生严重的布朗运动,又不能太大,以至于当油滴只带少数几个电子的电量时,电场力就足以与重力平衡。如果需要带的电量太大,则增减一两个电子时将不会明显地破坏平衡,测量也就无法进行。②油滴必须是圆的、均匀的、亮的、不蒸发的。前两个要求保证油滴重量可准确计算,亮是为了便于观察,不蒸发是为了测量过程中油滴的质量不会改变。③电容器极板间距不能太小,否则尚未调到平衡时油滴就会碰上极板;又不能太大,否则,为了使电场足够强,需要的电压就太高,在当时的技术条件下有困难,而电场需要很强也是为了保证油滴只带少数几个电子电量时,电场力就足以与重力平衡。④不能有空气扰动,因此装置必须密闭,并保持恒温。⑤油滴电量的改变必须方便,而且可以方便地调节电场的强弱和改变方向(油滴有时带负电,有时带正电),所用电源的电压必须稳定,等等,综合以上这些要求,在当时的技术条件下,实验确实是很困难的。由这个例子可以看到,实验原理总是比较理想化的,但要完成实验,就必须考虑许多复杂的实际问题。

下一个程序就是实验操作。做实验必须要有清晰的物理思想作指导,即必须熟悉实验目的,设计思想和原理,了解仪器设备的性能、量程和精确度,需要控制和改变哪些条件等,对实验结果要有粗略的估计。对于那些调节参数比较多的实验,要用正交法等数学方法安排实验方案,布置好测试点,并画出表格准备记录,这样才不至于漏测数据。要记住实验注意事项以确保仪器不被损坏,熟悉误差和有效数字以确保实验数据的精确度。要有严谨的科学态度,耐心细致和忠实地记录实验条件和实验数据。只有这样精心操作和记录的数据,才有较高的可信度。测试完成后,要对原始数据进行分析 and 处理,通常需要作一些数学计算,用作图法、逐差法、平均法、回归法等寻求物理量之间的相互关系,最好是用数学公式逼近这种关系,以便对实验现象得出规律性的认识,后面这些工作通常也可用计算机来完成。最后要提出一定的简化模型,用已知的物理原理对实验结果作出理论

解释或作必要的讨论。

以上我们对实验程序进行了一般性的叙述,对于那些重要的实验,例如作出重大的新发现,验证理论预言,精确测定物理常数等实验,还有许多特殊的要求。例如,为了有新发现,就必须创造前人从未达到过的实验条件,即向极限挑战,比方说超低温、超高温、超高压强、高能量、超强电场或磁场,或者设计出前人从未使用过的新方法或新仪器,而这些工作本身就属于开拓性的工作,因而具有重大意义,它对实验者的素质和水平有很高的要求,有的甚至要花费他们毕生的精力。目前世界上从事物理学研究的学者,大约有 90% 从事实验研究,仅有 10% 左右从事纯理论研究,而且总的趋势是,从事实验研究的人往往将实验结果和理论分析同时发表,不作实验的人很少有机会对新现象作理论探讨。

第二节 物理学中常用的思想方法

历史表明,科学的发展离不开理性思维的指导和正确的研究方法的运用。它使我们透过现象看清本质,从而深化我们对周围世界的认识。从被动地适应自然到主动地改造自然。本节我们简单介绍物理学中常用的思维方法,使学生尽快地掌握开启科学大门的钥匙。

一、科学抽象

前面说过,物理学研究物质的存在形式及其运动规律,世界上不存在抽象的物质,有的只是一个个实际的物体或者一种种实际的场,也不存在单一的物理过程,实际的物理现象和过程都是众多因素共同作用的结果。但是,为了表述物理定律或建立物理理论,需要排除次要的、非本质的、非决定性因素的干扰和影响,简化和纯化物理过程,才能突出重点,抓住本质。

1. 理想化模型的建立

物理学中有很多理想化模型,如质点、点电荷、刚体、理想气体,不可压缩流体、理想热机、无穷大带电平面、无限长载流直导线、光滑斜面、准静态过程,等等。它们都是在一定条件下对实际物体或实际物理过程的抽象。例如,在研究地球公转时,可以把它看成质点;在研究地球自转时,可以把它看成刚体;在研究地震波的传播时,可以把它看成弹性体。抽象的物理概念或物理模型有些是表述物理定律的需要,有些是为了在物理学中运用数学工具的需要,有些是纯化物理过程的需要。例如,表述库仑定律需要引进点电荷的概念,一方面,如果两个带电体的距离比它们的尺寸大得多时,把带电体当成点电荷,库仑定律就能相当精确地给出它们之间的静电力。另一方面,若带电体相距不太远,总可以把它们分割成无数小块,把每一小块都看成点电荷,再把一对一对点电荷之间的作用力进行叠加,就可以求出总的的作用力。这样,只要表述一对点电荷之间静电力的规律,再加上电力叠加的法则,整个静电作用的规律就完全清楚了。如果不是这样,而是按照实验的原型分别给出具体的带电体之间力的公式,不仅没有必要,实际上也不可能。很显然,像无穷

大带电平面、无限长载流直导线等概念的引进,主要是数学上的需要,它们的电场或磁场的数学公式特别简单,同时又是实际的带电大平面或载流直导线的很好的近似。实际物体与斜面之间总有一定的摩擦力,对它的运动总有一定的影响。但是,摩擦力是可以设法减小的,减小的程度原则上没有什么限制,在极限情况下,摩擦力趋于零,这就是光滑斜面。采用了这个模型,就把重力的影响突出出来了。理想气体的概念也是如此,它是对一定压强和温度范围内真实气体的很好的近似,由此推导出来的理想气体的压强公式,也排除了许多实际因素的影响,突出了主要矛盾。这样的例子是举不胜举的。在学习时,学生应当了解这类概念的使用条件,决不能绝对化。

2. 数学抽象的应用

在物理学研究中经常遇到这样的情况,即虽然物理过程完全不同,但在数学上完全是同一个问题,可以用同一个数学模型来概括。最典型的例子是简谐振动。这是自然界中一类十分普遍的运动形式,例如,弹簧振子及小摆幅的单摆和复摆的运动,固体中晶格的振动,电磁波传播中电场和磁场的振动,等等。在这些例子中,所涉及的物理对象满足相同的微分方程,解的形式也完全相同。简谐波的情况也与此类似。另外,如气体分子的扩散、热传导、内摩擦现象这些看来是不相关的物理过程,在数学上也有共同之处,可以归为一类。在物理实验中也会遇到类似的情况,例如,伽利略在做斜面实验时发现,在斜面倾角一定的条件下,斜面上的物体在相等时间内通过的距离之比,两相邻的时间间隔内通过的距离之差是一个常量。由此可推断,物体运动的距离正比于时间的平方,这其实就是第一节中提到的逐差法。这个规律不限于斜面实验,也不限于机械运动,而是普遍成立的,因此在数学上可以统一起来。物理学家和数学家们共同发展了一个专门的数学分支,叫做数学物理方程,把不同物理过程中遇到的共同的数学问题集中起来研究,反过来作为物理研究的工具。

二、分析与综合

分析与综合是物理学中常用的思维方法。所谓分析,就是把研究对象分解成各个组成部分,对各部分加以研究,而综合就是把研究对象的各部分联系起来,从整体上把握事物的本质和规律。最典型的例子是用牛顿定律解题时所采用的隔离体法,把本来是相互关联的一组物体隔离,分析每个物体的受力情况和运动情况,列出各自满足的牛顿方程,这就是分析。但是,实际上这些隔离体并不独立,为了还事物的本来面目,还应把它们综合起来一起考虑。隔离体之间的关联分为两个方面:其一是它们相互之间有作用力;其二是隔离体的运动状况受某些条件约束,前者体现为作用力和反作用力成对出现,后者体现为隔离体之间的运动学量要满足一定的方程。由这个例子可以清楚地看出分析和综合的三个环节:

- (1) 把整体加以解析,把部分从整体中分割出来。
- (2) 深入分析各部分的特点,研究它们各自应满足的规律。
- (3) 找出各部分之间的联系和相互作用,综合得出对整体的认识。

分析与综合的这些环节,更大量地体现在所谓的元过程分析法或微元分析法中,这就

是把研究对象按空间分割成无限多个无限小的部分,即微元,或者把整个物理过程按时间划分成无限多个无限短暂的过程(元过程),先抽取其中的一个典型元加以研究,然后再综合出整体的情况。数学中的微积分是该方法的有力工具。

综合还有一种重要情况,即被综合的各部分一开始并不是从一个复杂的现象中拆分出来的,它们原来被认为是孤立的、互不相关的不同问题,随着资料的积累和人们认识水平的提高,逐渐发现了它们之间有内在联系,可以综合在一起。这样的综合在实验和理论研究中都有很好的例子。例如,法拉第进行电磁感应现象的实验时发现,磁铁和线圈的相对运动,线圈所处的磁场发生变化,线圈转动或变形,都会出现感应电流。把这些不同的实验综合起来考虑,发现有一个共同点,那就是通过线圈的磁通量发生变化。这个综合使法拉第抓住了问题的本质,总结出了电磁感应定律。在绪论中讲到的物理学发展的五次大综合,是理论研究中应用综合法的例子。这类科学综合对物理学的发展有更重要的意义,它往往使人类产生认识论上的飞跃。

三、归纳与演绎

1. 归纳法

归纳法就是从个别事例中概括出一般概念和普遍规律的思维方法。牛顿曾说:“一切定理均由现象推得,用归纳法推广。”归纳法的一般程式是:实例—假设—求证,与数学归纳法的程式相同,但其中的每一步都有物理学自己的特点。应用归纳法,首先要收集资料,取得事例。例子越多越好,最好是正反面的例子都有,而且要十分确切,对它的各个环节和细节要掌握得很详细,这样才能进行分类、排队、分析、整理,剔除非本质因素,找出它们的本质特征,然后提出带有普遍意义的假设。这一步要求研究者有深邃的洞察力,因为假设不是逻辑上的惟一可能,它多半带有猜测的成分,因而往往有错误。下一步就是求证,首先,你的假设必须与已掌握的全部例子没有矛盾,这还不够,你还必须从假设出发作逻辑推理或数学演算,力求导出一些新的结论或者说预言,只有理论的预言得到进一步的实验证明,你的假设才可能得到公认。有一种常用的逻辑推理方法值得提一下,那就是思想实验,其实它不是真正意义上的实验,而是一种思辨方式,其目的是考察一个新假设会不会导致逻辑上的矛盾。这种实验可能是根本无法实现的,或者至少现阶段无法进行。例如爱因斯坦的升降机实验,从加速系统与引力场的等价性假设出发,导出了光线在引力场中会发生弯曲的结论,后来为观测所证明,海森伯的射线显微镜实验导出了不确定关系,等等。应当指出,不管有多少个理论预言被进一步的实验证实,都只能算是例证,与数学中的证明是不同的。作为一门实验科学,在物理学中例证往往被允许,而且很有效。例如,热力学第一定律的一种表述是:“永动机是不可能做成的。”其本质是能量守恒。这种用“不可能”所表述的定律,难以作出像数学上那种严格证明。下面我们举几个应用归纳法的例子。

1820年,奥斯特发现了电流的磁效应,安培得知这一发现后,立即进行了大量实验,测量了一些特殊形状的电流的磁场分布,如圆电流、长直电流、螺线管等。毕奥和萨伐对安培的实验进行了深入研究,归纳出电流元产生磁场的公式。实际上并不存在孤立的稳

定电流元,但是,用这个公式,根据磁场叠加原理,不仅能计算出安培已测试过的那些结果,还能计算出任意稳定分布的电流的磁场分布,而且得到进一步的实验证实。该公式现在称为毕奥—萨伐定律。这个例子还告诉我们,在作出科学的归纳时,有时需要提出一些理想化的概念。

18世纪末,意大利生物学家伽伐尼偶然发现,当解剖刀碰到死青蛙腿部的神经时,蛙腿猛然抽动。此后他做了大量实验,用铜钩钩住蛙腿,钩的另一端与铁窗相碰,蛙腿又抽动。他猜想原因可能是青蛙带电。青蛙身上的电量从哪里来的呢?是自己产生的还是把大气中的电储存起来了呢?因为他当时知道富兰克林的风筝实验证明雷雨云带电,也知道莱顿瓶(一种电容器)可以贮存电荷。为了作出判断,他把青蛙用金属屏蔽起来重复试验,结果还是一样,于是以为已找到了现象的真正原因。他说:“根据我们至今所了解和研究过的一切,我认为完全有理由肯定,动物具有电。”并称之为生物电。也就是说,伽伐尼假设生物自身会产生电,它是肌肉收缩的原因。

意大利自然哲学教授伏打对伽伐尼的生物电假设存有疑问,决定亲自做实验。他用当时已知的方法获得的电流通过青蛙肌肉,发现青蛙也发生抽搐。该实验证明了蛙腿的神经反应是被动的,它就像一台“仪器”,只是反映了电流的通过,而不是产生电流的原因。他又仔细地研究了伽伐尼当年做过的实验,发现伽伐尼忽略了一个十分重要的细节,铜钩与铁窗相碰,涉及了两种不同金属的接触,于是猜测不同金属接触会产生电势差,类似于一个电源,这是蛙腿中有电流的真正原因,经过大量实验,他排出了一个序列:锌、锡、铝、铜、银、金……这就是著名的伏打序列,在这个序列中,相距越远的两种金属接触,接触电势差就越大。这两个例子很好地说明了归纳法是如何从特例推广到一般的。第二个例子还说明了,如果对特例的掌握不够全面,有时会得出错误的结论。

2. 演绎法

演绎法是从一般到特殊的推理方法。演绎推理是一种必然性的推理,它也是作出科学预见的一种手段。因为演绎无非是把一般原理应用到具体场合,中间环节只是逻辑的运用,因此其结论范围不可能超过前提范围,对演绎结论的每一个实验验证,都应视作对普遍原理的一个证明。

物理学中运用演绎法的例子是很多的。例如,从库仑定律出发,可以推导出一个带电的空腔导体,电荷都分布在外表面,内表面上不可能存在电荷。用实验直接验证库仑定律(库仑扭秤实验),精确度十分有限,但是验证导体空腔内壁是否带电,精确度可以很高。

在爱因斯坦的相对论中,应用演绎的例子比比皆是。在狭义相对论中,爱因斯坦从相对性原理和光速不变原理出发,导出了时间膨胀、长度收缩、同时的相对性、质能关系等重大结论,后来一一被实验证明。

极限法也是一种演绎法,这是把普遍的结论应用到极限情况,以检查普遍结论是否有错误的一种方法。例如根据牛顿运动定律,可以推导出以抛射角 α 斜上抛的物体的射程和最大高度的公式。在有极限情况下,应该得到竖直上抛的公式,如果不是这样,那么公式肯定有错。又如用库仑定律和场强叠加原理,可以求出某些形状和特定电荷分布的电

场强度公式,当场点离带电体很远时,它应当趋于点电荷的场强公式,因为如果场点离带电体的距离比带电体的尺寸大得多时,就可以把带电体看成点电荷,这是我们引进点电荷这一抽象概念的一个前提。学生掌握了极限法,可以帮助检查作业中的错误。

四、类比法

类比也是物理学研究中常用的一种思维方法。如果我们发现一个新现象与另一个现象之间有某种相似性,而后者我们已仔细研究过,那么就可以通过类比的方法加速对新现象的研究,或者给新现象一个生动直观的图像。这方面的例子也很多。例如,刚体定轴转动中的许多公式,与质点运动学和动力学的公式有许多相似之处,可以联系起来学习和记忆。库仑定律和万有引力定律都是平方反比定律,两者存在类比关系,因此由它们推得的许多结论也有很多类似之处,例如,放在带电空腔内部的电荷所受电力,与放在空壳内部的物体所受的引力作用类似。光波和电子波具有相似性,既然利用光学透镜可制成显微镜,那么利用电磁透镜也就可以制成电子显微镜,因为同样是波,两者都会出现衍射现象,光学显微镜的分辨率与光波的波长成反比,而电子波的波长比可见光的波长短得多,因此电子显微镜的分辨率一定比光学显微镜高。电子波的波长与光的波长差不多,光可以被晶体衍射,因此电子波也可能被晶体衍射。原子核内的核子(质子和中子)之间的作用(核力)是一种近程相互作用,液体中各分子之间的相互作用(范德瓦尔斯力)也是一种近程作用,因此含核子较多的原子核有可能类似于液滴,核物理学中的液滴模型就是根据这种类比提出的。

类比方法不仅适用于学科内部,还可用于不同学科之间。例如,细胞是一个远离平衡态的开放系统,它通过新陈代谢与外界交换物质和能量,可与物理学中的耗散结构类比。近年来,在社会科学研究中引进了不少自然科学的概念模型,如企业生态学这门学科,就是把企业看成一个细胞,它有新陈代谢,因而也是一种耗散结构。这种结构的一个最主要特征是,它不同于一定条件下的平衡态,而是存在一种自我调控的机制,以适应不断变化的外界条件,在外界条件不是偏离太大的情况下,它还能通过获得“负熵”而使自身生长发育。研究表明,人体就是这样一个系统。病重行将死亡的人,心律反而是很整齐的,健康人的心律总是有些波动,说明健康人有自我调节能力,失去了这种能力,他离死亡就不远了。

第三节 定性和半定量方法

本节介绍物理学研究中的定量、定性和半定量方法。不管是物理实验,还是理论研究中的分析、综合、归纳、演绎、类比,都离不开它们。因此需要作一些专门的叙述。

一、定量研究方法

物理学是一门严格定量的科学,对现象只作定性的考察是远远不够的,因为这样做往往会导致错误,另外,定量研究往往成为作出新发现的契机,以及支持新理论的证据。下

面举几个例子(图 1-1)。

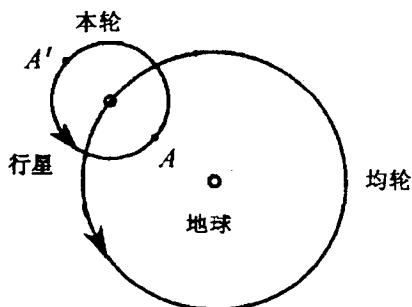


图 1-1 行星运动的本轮、均轮模型

公元 150 年,亚历山大城的数学家、天文学家托勒密为了解释行星的不规则运动,在地心说和圆形轨道的基础上,提出了行星运动的本轮、均轮模型。这个模型的要点是,行星在一个较小的圆周上作匀速率运动,这个圆叫本轮,而本轮的中心又在围绕地球的大圆上作匀速率运动,这个大圆叫均轮,如图 1-1 所示。根据天文观测数据,调节本轮和均轮的半径以及两种圆运动的速率,就可以解释行星在天球上的顺行和退行现象,例如,当行星在图中的 A 点时,从地球上看起来,它退行,而在 A' 点时,它顺行。此模型还能定性解

释行星的亮度变化。但是,不管怎样调节四个参数,即两个半径和两个速率,该模型定量方面与观测不符。于是托勒密在小轮上再加一个轮,这样一套一套加上,最后,加到 80 多套,由此算出的太阳、月亮和行星的位置和观测值的误差在 2° 以内,在以后的 1400 年内,一直是航海和编制历法的指导性理论。15~16 世纪,随着观测设备的进步,相继发现了托勒密的理论体系无法解释的新问题,特别是根据该体系制定的历法,到 15 世纪已经比实际提前了 11 天之多,根本无法使用了。

哥白尼提出日心说后,人们一度仍沿用托勒密的本轮、均轮模型,但数量仍需要 30 多套,与此同时,第谷对行星的运行进行了长达 20 多年的精心观测和记录,当时望远镜还没有发明,他用极简陋的仪器观测,凭借着严谨的科学态度,使得对星体位置的测定误差不大于 $4'$,相当于一根针的粗细放在一臂远处对人眼所张的角度。开普勒继承了第谷的宝贵观察资料,经过 70 次试探,他找到的最佳方案与观察资料仍有的偏差,超过第谷的观察误差 2 倍,又经过 4 年的艰苦计算,断定火星的轨道决不可能是正圆,也不是偏心圆,而应该是椭圆,太阳就在椭圆的一个焦点上,这就是开普勒第一定律,它也适用于当时已知的其它行星。开普勒后来说:“就凭着 $8'$ 的差异,引起了天文学的全部革新。”这个例子对我们至少有三点启示:①一个错误的假设,如果搞得很复杂,而且引进了大量可调节的参数,有时也似乎能与实验符合;②托勒密的圆形轨道或者后来的偏心圆,都是先验的,没有任何实验作为依据,这种先验论的或者叫先入为主的思想,往往束缚人们的想像力;③从托勒密到开普勒,说明了精确和定量的研究方法是真理和谬误的试金石。

在牛顿发现万有引力定律以后,人们对当时已知的行星轨道作了详细的计算,发现天王星的运动总是与观察不符,即使考虑了土星和木星的影响后也是如此,1845 年,法国的青年天文学助教勒维耶进行了一年多的艰苦计算,得出了可能影响天王星轨道的新行星位置等的的数据,于 1846 年写信告知柏林天文台的天文观测家加勒。加勒收到信的当晚,和他的助手在不到 30 min 的时间内,就在勒维耶指定的位置范围内找到了太阳系的第 8 颗行星,这就是海王星。这是牛顿万有引力定律的光辉胜利。实际上,比勒维耶早一年,剑桥大学的学生亚当斯也作出过同样的计算,并于 1845 年 9 月把计算结果送给英国皇家

天文台,但这个年轻人的论文未引起权威们的足够重视,直到第二年才进行观测,并且也发现了这颗新行星,不过为时已晚,他们痛失了首先发现的机会。

氩气的发现是定量化研究取得成功的又一个例子。英国的瑞利勋爵长期从事气体密度的测量工作。他发现,用氨(NH_3)在空气中催化燃烧得到的氮气和空气直接去除氧气后得到的氮气密度不同,前者比后者小0.1%。他说:“这个差值虽小,但它完全超出了实验误差范围……我很困惑,不知道怎样继续研究……实验工作中有一条好的规矩,当差值一开始存在时,我们总要放大这个差值,而不是凭感情放弃它。两种氮气到底有什么差别?一种氮气全部来自空气,另一种氮气约有1/5来自氨。”后来他改用氧气去除心中的氢,这样得到的氮气就全部来自氨,其密度比空气中得到的氮气的密度轻1/200。他猜想空气中的氮气可能含有一种未知的化学成分。经过艰苦的分离工作,终于分离出一种未知的气体,体积约占空气体积的1%,密度约为氮气的1.5倍,它不参加任何化学反应,后来这种气体取名为氩。

再举一个近代物理的例子,20世纪初,物理学家开始了对原子结构的研究。1897年汤姆逊发现电子后,很自然地把电子看作是原子的组成部分。由于原子整体不带电,而电子带负电,所以汤姆逊提出了原子结构的镶嵌模型,认为原子像一个均匀带正电的球体。电子镶嵌于其中,如图1-2所示。这种“面包夹葡萄干”式的模型,定性地说,也能解释原子的电中性,电子会从原子中跑出来等实验现象。在天然放射性发现以后,1911年,卢瑟福进行了 α 粒子被金原子散射的实验,即著名的卢瑟福散射

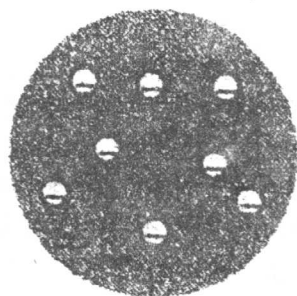
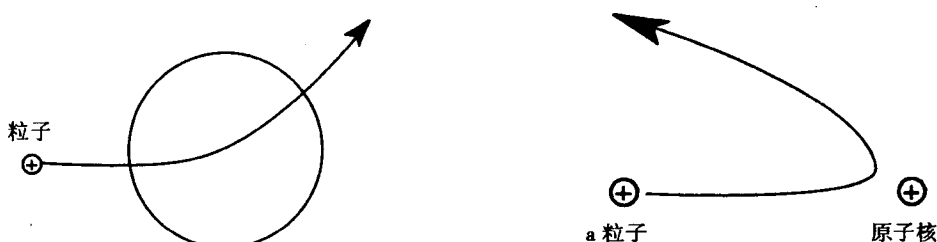


图1-2 汤姆逊的原子结构模型

实验。他发现, α 粒子有时会大角度散射,因此断定原子中的正电荷实际上集中于比整个原子小约 10^5 倍的一个小范围内,按照定量计算,汤姆逊模型不可能产生大角度散射,因而实验否定了这种模型,代之以核式结构模型(图1-3)。这个模型同样承认电子是原子的组成部分,但是,与汤姆逊模型不同,卢瑟福认为原子中心是一个带正电的核,电子在核外绕核转动,就像行星绕太阳转动一样。这个模型又带来一个新的问题,因为按照经典电动力学,电子绕核运动有加速度(向心加速度),因而必然会发射电磁波,从而损失能量,因此迟早会掉到核上,即原子不可能是稳定的,而且电子在往原子核上掉的过程中,转动周期会越来越短,因此原子发光应是连续谱,但在此之前,光谱测量表明,原子发出的光都具有离散谱,每种原子的光谱都由一系列确定波长的谱线组成。为了解释原子的稳定性,以及原子的线状光谱,玻尔于1912年提出了他的原子结构理论。这个理论包含了几条在当时来说是不可思议的假设,他据此计算了氢原子光谱的谱线波长,结果发现与实验有四位有效数字符合。氢原子的谱线有很多条,这种数量上的一致性决不可能是偶然的。而应看作是对玻尔理论的大力支持。但是,当用这个理论去计算复杂原子的光谱时,却出现了大的偏差,而且该理论无法解释谱线的强度,表明它不可能是最终的理论,应代之以更完善的新理论。这个新理论应当包含玻尔理论的合理成分,这就是后来建立起来的量子力

学。



(a) 汤姆逊模型不可能产生大角度的散射
(b) 核式结构模型可能产生大角度散射

图 1-3 汤姆逊的原子结构模型

既然物理学离不开严格定量的计算,所以就必须对一些基本的物理量、计量单位和物理常数作出精确的定义、规定和测试,在第五节中,我们将作专门介绍。

二、定性和半定量方法

以上我们阐述了严格定量的方法在物理学中的重要性,其中提到,满足于定性讨论有时会导致错误。这样说可能会给人一个错觉,即定性分析方法靠不住。卢瑟福也曾说过:“定性就是量化不够。”其实定性和半定量方法十分有用,它往往使人们透过冗长的数学计算构筑的迷雾,迅速地发现和抓住事物的本质。一个优秀的物理学家在作严格的定量计算以前,总是要先进行定性的分析和半定量的估算,对问题的概貌取得一个总体的了解,从中发现支配复杂现象的规律的端倪,以免走弯路。

定性和半定量方法很多,例如对称性和守恒量分析法、量纲分析法、数量级估计法以及上一节已提到过的极限法或特例法等,我们对前三种分别作些介绍。

1. 对称性和守恒量分析法

在自然界中,普遍存在着各种各样的对称性,例如雪花、植物的叶脉、花朵和种子的形状、人和动物的体形、矿物和金属的结构等都有对称性。古往今来,人类对于对称性始终有特殊的偏爱,如绘画、雕塑、工艺品、器物、建筑物等,对称性随处可见。在物理学中,对称现象受到普遍重视。人们发现,自然界中存在着一条普遍的定理,即原因的对称性必然在结果中得到体现。例如,一个均匀带电球体具有球对称性,因此它的电场分布也有球对称性,空间各点场强的方向必沿着径向,大小只与场点与球心的距离有关,而与表示方位的角度无关。均匀导电的无限长直线具有对直线所在的轴的旋转对称性,因此电场分布只与离轴线的距离有关,而与方位无关,而且具有沿轴线的平移对称性,即在垂直于轴线的不同平面内,电场分布都相同。两个等量同号的点电荷,具有对于它们连线的垂直平分面的镜像对称性,以及对于通过两者的轴线的旋转对称性,因此等势面的分布也有同样多的对称性。对于随机事件,定理的表现形式要稍加修改。例如,把一枝削尖的铅笔头朝下地倒立于桌面,只要保证铅笔严格地在竖直方向,则它就具有以它自身为轴的旋转对称性,然而放开后,它总是倒向一边,结果不再对称。但是,如果把这个过程重复很多次,再对铅笔倾倒的方向作统计,就可以发现统计结果也具有旋转对称性。即随机事件中原因

的对称性体现于统计结果之中。了解了这些,对于学好物理以及从事研究工作都是大有好处的。

物理学经常要研究各种各样的变化过程,过程总要涉及物理量随时间的变化,但是许多过程中往往存在一些不变的量,他们受一系列守恒定律支配,掌握了守恒定律的条件,就能找出守恒量,即过程中的不变量,从而使问题简化。例如,当质点所受合外力为零时,其动量守恒,当系统所受的外力和非保守内力不作功时,系统的机械能守恒。还有一些更普遍的守恒定律,如能量守恒、质量守恒等。举一个简单的例子就能说明守恒定律是如何使物理问题得到简化的。例如,滑雪运动员从高低起伏的雪道上滑下,要求出它的末速度的大小。在这个过程中,如果忽略摩擦损耗,机械能是守恒的,而问题又只涉及它的初态和末态,这时,由机械能守恒定律就可以很方便地求出结果,而不必考虑复杂的中间过程,特别是不需要知道轨道的具体形状。

研究表明,对称性和守恒定律存在着深刻的内在联系,物理定律的任何一种对称性(或者说不变性),都伴随着一个相应的守恒量。反过来说,任何一个守恒量,都是物理定律的某一种对称性的反映。例如,空间平移不变性导致动量守恒,时间平移不变性导致能量守恒,空间转动不变性导致角动量守恒,等等。这些都是经典物理学中的例子。在近代物理学中还有更多的例子,在经典物理学的范畴内很难把他们解释清楚,例如空间左右对称性导致一个叫做“宇称”的物理量守恒,物理规律在洛伦兹变换下的不变性导致质量守恒,等等,此处不作详细介绍。

2. 量纲分析法

关于物理量的单位和量纲,我们将在第五节中专门讨论。这里仅指出两点:一是当我们要分析一个变量与哪些因素有关时,有时可以用量纲分析法来帮你确定。二是用量纲分析法可帮你检查计算结果是否有错误,因此量纲分析法也是学习物理和从事物理学研究常用的方法。

3. 数量级估计

数量级估计是一种半定量方法。物理研究中并非任何情况下都要作精确计算。有时研究的目的是为了否定某些猜测或结论,这时作出数量级估计往往很有效,即使需要精确计算的场合,如果能先作出数量级估计,对事物的总体性质有一个了解,对后面的工作也有很大好处。物理实验中,在进行测试以前,精确的数据尚有待测定,这时作数量级估计往往可以帮助你选择合适的测量仪器及其量程。下面我们举几个例子说明数量级估计方法的应用。

例1 估计太阳的总辐射功率,并说明它不可能来自化学能。

解 查得日地之间的距离 $\gamma_{\text{日地}} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$, 阳光在地面上的照射功率约 1 kW/m^2 , 取 $\gamma_{\text{日地}} \approx 10^{11} \text{ m}$, 则以太阳为中心, $\gamma_{\text{日地}}$ 为半径的球面面积 $4\pi\gamma_{\text{日地}}^2 \approx 10^{23} \text{ m}^2$, 假设太阳光均匀照射在此球面上, 则总功率应为 $10^{23} \text{ m}^2 \times 1 \text{ kW/m}^2 \approx 10^{23} \text{ kW}$, 这就是太阳的总辐射功率。如果考虑到 $4\pi = 12.56$, $1.5^2 = 2.25$, 则此值为 $2.8 \times 10^{23} \text{ kW}$ 。实际值为 $4 \times 10^{23} \text{ kW} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$, 计算值偏小是由于我们没有考虑大气的散射和吸收以及云层的反