

大学文科物理

 DAXUEWENKEWULI

贾慧凯 陈劲波 傅仁春 编

 云南大学出版社

大学文科物理

贾惠凯 陈劲波 傅仁春 编

 云南大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学文科物理/贾惠凯, 陈劲波, 傅仁春编. —昆明:
云南大学出版社, 2005

ISBN 7-81068-929-0

I. 大... II. ①贾...②陈...③傅... 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 013322 号

大学文科物理

贾惠凯 陈劲波 傅仁春 编

策划编辑 柴 伟 徐 曼

责任编辑 康 实

封面设计 张严翔

责任校对 虞 红

出版发行 云南大学出版社

印 装 昆明理工大学印刷印务包装有限公司

开 本 787mm × 1092mm 1/16

印 张 10

字 数 250 千

版 次 2005 年 2 月第 1 版

印 次 2005 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-81068-929-0/O·50

定 价 18.00 元

地 址: 云南省昆明市翠湖北路 2 号云南大学英华国内
(邮编: 650091)

发行电话: 发行部 0871-5033244

网 址: <http://www.ynup.com> E-mail: market@ynup.com

内容提要

本书是为非理工类专业编写的大学物理教材。基于非理工类学生数理基础，语言尽量深入浅出，不追求推导的严密。全书共十章，前五章介绍经典物理和近代物理的基础知识、基本思想、物理学所揭示的自然界基本法则；后五章解读物理学与相关高科技关系，知晓人类文明现状。章后配有习题，供思考和练习及了解一些基本数据之用。本书以非理工类学生提高科学素养、获得科学世界观和方法论的启迪为目标。

本书可作经济、管理、法律、文史哲、外语、大众传媒、建筑学等非理工类专业教材，也可供理工类专业和社会读者作扩大知识面、了解物理学史及著名物理学家创造性思维之需。

本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。

本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。

本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。

本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。本书可作为非理工类专业大学物理教材，也可作为理工类专业大学物理教材的补充教材。

前言

当今世界科学技术以前所未有的速度发展,出现不同学科不同专业相互交叉、渗透、融合的趋势。对学校教育的要求是使课程结构综合化,文理互融,理工结合,以利培养和谐发展的、既有广博知识又有完善人格的、善于相互沟通相互合作的优秀人才。专门化教育可能培养出某一科技领域的专家,却对人类文化的另一组成部分知之甚少,这一局限性必然导致自身专业活动中的短期行为和全局观念的缺乏。

非理工类学生可能不需要那么多物理学理论,但物理学揭示的自然规律、物理学语言描述的自然界根本法则、物理学包含的自然哲学却是必须知道的,它对形成世界观、提高科学素养、培养科学思维方法,有着不可替代的作用。物理学并不只属于理工类,也属于非理工类。

因是为非理工类专业所作,该书没必要成为理工类大学物理教程的压缩版或简化版。它首先是一本物理基础课,概念要准确,要有一个相对完整的体系,却没必要陷于过多的数学推导,很多结论可直接给出,只要呈现出一定的推理路径即可。但为适应不同专业的需要,书中又以注释形式指出了参考书。本书的特点可以归结为以下几点:

1. 用深入浅出的语言介绍物理学基础知识、基本思想、物理学所揭示的自然界基本法则,不追求推导的严密和数学上的完美。
2. 突出物理学包含的哲学思想,以利对世界形成正确的认识。
3. 突出物理学处理问题的逻辑推导过程,强调物理学的方法论。
4. 结合物理学史,介绍著名物理学家创造性的思维、勇于创新的精神及对科学奉献的精神。
5. 解读物理学与相关高科技的关系,知晓人类文明的现状。

本书编写分工如下:第一章至第五章贾惠凯,第六章至第十章陈劲波、贾惠凯,傅仁春选编部分习题。全书由贾惠凯统稿。

本课程从设课,到印刷讲义,再到教材正式出版,得到教务处、理学院、物理系领导富有见地的支持和理解,并蒙同行、专家提出不少修改意见,我们由衷地感谢。

因为对物理学理解和知识面所限,本书不论在指导思想、内容选取、编排、叙述等方面都有商榷之处,借此机会恳请赐教。

编者
2004年

结 论

物理古称自然哲学，是研究物质的基本结构、相互作用及其运动规律的学科。物质是不依赖于人的意识而独立存在的客观实体。从古到今，在不断的探索中人们形成了物质世界的总体图像：物质由粒子（人们迄今能认识到的组成物质的基本单元）组成；物质以实物和场这两种基本形式存在；物质处于不断的运动之中。人们首先从观察宏观物体及其运动开始，以 1687 年牛顿发表《自然哲学的数学原理》为标志，至 19 世纪后期，构架了经典物理体系。生产力的发展推动科学技术的发展，经典物理日益暴露出其局限性。19 世纪末 20 世纪初，以普朗克为先导的量子论、爱因斯坦的相对论，使物理学进入近代物理阶段。他们的新观点开拓了人类视野，极大地推动着科学技术发展，既造就了现代文明，也深刻影响着未来。

以下从物理学与科学技术、物理学与自然哲学、物理学与社会科学三个方面阐明物理学对社会发展的贡献。

一、物理学与科学技术

人类社会从原始社会过渡到当今文明社会，经历了漫长的发展过程。什么在推动社会的发展？马克思在 19 世纪指出，生产力的发展是一种恒定的推动社会发展的基本动力。20 世纪，科学技术更明显地表现出它是生产力中最活跃的、起决定作用的因素。物理学被公认为科学技术发展中一门重要的带头学科。20 世纪与物理学有关的重大科技发现或发明可以列出很多，就这近 20 年，超大规模集成电路、微机的普及、移动通讯、数码相机、数字化电视、磁悬浮列车、克隆羊、登上火星……无一不基于物理学理论的发展。人们在尽情享受现代文明的同时，不能忘记是科技水平决定了国家的综合国力。

世界变化得这么快，简直超出所有人的预料。然而仔细观察周围，冷静思考一下，不难发现人类的生存和可持续发展正面临严重的威胁。科学技术一再显示它是一把双刃的剑，经常在人们还没来得及对其仔细审视时就已经造成了残酷的事实：在塑料带来方便实用的同时，废弃塑料造成了白色污染；超量提取地下水引起地壳下沉、土地荒漠化、海水倒灌等；网箱养殖造成水体过度营养化；肉牛工厂化生产造成疯牛病扩散；克隆技术一旦延伸到人带来的伦理社会问题……人们特别是一些处于决策地位的人，是否意识到人类向自然界的过度索取已经受到自然的惩罚呢？如果人类不能走出误区，不能自觉地把自已作为自然界的一个成员与其他成员和谐相处，毁灭的将是人类自己。

二、物理学与自然哲学

在古代不论是中国还是西方，科学和哲学本是一家。文艺复兴以后自然科学开始与哲学分离成为独立的学科，但是物理学一直与自然哲学联系在一起。一方面，物理学的不断发展为哲学家提供了越来越多的事实；另一方面，物理本身包含了深刻的哲学思想，物理学中物质观、运动观、因果观、时空观、方法论和认识论的研究都处于自然哲学前沿。

在科学发展史上，绝大多数物理学家、数学家、化学家在自己的研究工作中自觉或不

自觉地站在唯物主义立场上，但在新发现冲击下，往往本能地防卫旧阵地，力图使新发现与旧理论协调起来，一再地把新发现纳入旧理论框架，这不能不说是少了一些历史和哲学上的思考。

新的物理规律不断被发现，但物理学家从来不承认有什么终极理论，从来认为物理定律有其适用范围，这些定理是些相对真理。人们可以不断地去完善理论，但绝不可能达到终极理论。如牛顿三定律在宏观、低速条件下是非常成功的，但随着科学技术的发展，人们发现在高速、微观领域不适用，又代之以相对论和量子力学。科学技术的发展同它的哲学基础之间的不适应是经常存在的。这不外乎于两种原因，一是科学技术向前发展了，科学向哲学提出许多哲学问题，哲学概括落在后面；二是哲学上早已解决的问题自然科学家不了解或未掌握。从这一侧面也反映了科学文化与人文文化实现融合的重要性。

三、物理学与社会科学

仅把物理学看成是一门专业性的自然科学是不全面的。物理学的基本观点是人们自然观和宇宙观的重要组成部分。人类既生活在自然中，也生活在社会中，因而社会学问题可借助于物理概念来解决问题。譬如本是物理中的熵概念已引入社会科学，人类社会的发展趋势是沿着熵增加的方向发展的。为维持社会稳定和可持续发展，就要设法减慢熵增加的速度。再如物理学中常用的模型方法已经被广泛地移植到许多学科领域，如在经济学界发展起来的“量化经济学”等。

同时，物理学有社会教育功能。爱因斯坦说过：“科学对人类、事物的影响有两种方式。第一种方式是大家都熟悉的：科学直接地、并在更大程度上间接地生产出完全改变了人类生活的工具；第二种方式是教育的性质——它作用于心灵。”

物理学提示社会要求真。物理学是一门实验科学，崇尚的是实验是检验理论正确与否的唯一标准。严密的推理加上精密的实验构成物理学的研究方法。

物理学提示社会要不断地追求完美。牛顿总结出力学的三大定律，完成了力学的完美；能量守恒定律及其转化定律完成了力学和热学的完美结合；麦克斯韦实现了光、电、磁的完美结合；现在又在进行由相对论和量子力学带动起来的结合。

物理学每一进展都意味着后辈物理学家批判继承了前辈的思想，并加上了自己的创新。

爱因斯坦说：“学校的目标始终应当是：青年人在离开学校时是作为一个和谐的人而不是一个专家……发展独立思考和判断的一般能力，应当放在首位，而不应当把专业知识放在首位。如果一个人掌握了他的学科的基础理论，并且学会了独立思考和工作，他必定会找到自己的道路，而且比起那些主要以获得知识为培训内容的人来说，他一定会更好地适应进步和变化。”这应当是物理课的目的和我们的初衷。

目 录

绪 论	(1)
第一章 宏观物质运动的力学规律	(1)
§ 1-1 经典力学的建立	(2)
§ 1-2 经典力学对物体运动的描述	(3)
§ 1-3 牛顿三定律	(4)
§ 1-4 万有引力定律	(5)
§ 1-5 动量守恒定律	(8)
§ 1-6 能量守恒定律	(11)
§ 1-7 角动量守恒定律	(16)
§ 1-8 狭义相对论的主要结论	(18)
习题	(23)
第二章 场和波	(25)
§ 2-1 电荷的相互作用 静电场	(25)
§ 2-2 运动电荷间的相互作用 磁场	(26)
§ 2-3 对电场磁场的描述	(27)
§ 2-4 电磁感应	(32)
§ 2-5 电磁波	(34)
§ 2-6 光波	(38)
习题	(49)
第三章 多粒子体系的热运动	(52)
§ 3-1 热力学的基本概念 温度 内能 热量	(52)
§ 3-2 热力学第一定律	(55)
§ 3-3 热力学第二定律	(57)
§ 3-4 熵	(58)
§ 3-5 分子热运动的微观表象	(63)
习题	(65)
第四章 粒子之微	(66)
§ 4-1 人类对微观世界的探索	(67)
§ 4-2 19 世纪末的三大发现	(67)
§ 4-3 原子结构	(71)
§ 4-4 原子核结构	(79)
§ 4-5 粒子世界	(82)
习题	(85)
第五章 宇宙之巨	(87)

§ 5-1 宇宙	(88)
§ 5-2 宇宙学略介	(92)
§ 5-3 恒星的诞生演化及其归宿	(95)
§ 5-4 我们的地球	(96)
(1) 习题	(99)
第六章 物理学与现代自然科学	(100)
(1) § 6-1 物理学与化学	(100)
(2) § 6-2 物理学与生命科学	(102)
(3) 习题	(106)
第七章 能 源	(107)
(2) § 7-1 实用的能量转化	(107)
(8) § 7-2 常用能源	(109)
(11) § 7-3 能源危机和新能源	(111)
(10) 习题	(116)
第八章 材 料	(117)
(23) § 8-1 物理结构与材料性能	(117)
(25) § 8-2 半导体的应用	(126)
(22) § 8-3 超导体的研究和应用	(128)
(20) 习题	(130)
第九章 激 光	(131)
(32) § 9-1 激光原理	(131)
(34) § 9-2 激光器的结构	(132)
(38) § 9-3 激光器的种类	(133)
(40) § 9-4 激光束的主要特性	(134)
(22) § 9-5 激光的应用	(135)
(22) 习题	(139)
第十章 信息技术	(140)
(27) 习题	(145)
结束语	(146)
习题答案	(149)
参考书目	(151)
(10) 索 引	
(10) 附录 A 常用物理常数	
(11) 附录 B 常用物理量单位	
(12) 附录 C 常用物理公式	
(13) 附录 D 常用物理量	
(14) 附录 E 常用物理量	
(15) 附录 F 常用物理量	
(16) 附录 G 常用物理量	
(17) 附录 H 常用物理量	
(18) 附录 I 常用物理量	

第一章 宏观物质运动的力学规律

我们曾指出,物理学是以研究物质基本运动规律为内容之一的学科。从哲学上说,物质是不依赖于人的意识而独立存在的客观实体。物理学把物质分为实物物质和场物质。

实物是具有静止质量、占有一定空间、以空间间断形式存在的物质形态。按实物物质的空间尺度可以划分为宏观和微观两大类。宏观物质的线度在 10^{-7}m 以上,其最小尺寸相当于有机化合物中大分子的尺寸,在普通显微镜下可以看见。微观物质的线度大约在 10^{-7}m 以下,包括原子、中子、电子等。宏观物质显出粒子性,服从因果律,遵循经典力学或更有普遍意义的相对论力学。微观物质显示出波粒二象性,服从统计规律,其运动规律用量子力学描述。宏观物质表现为众多的微观粒子在一定的温度、压力等外界条件下聚集而成的稳定态,简称物态,大致可分为固态、液态、气态、等离子态等。

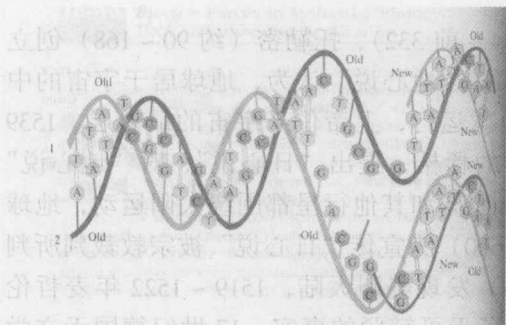


图 1-1 小尺寸的实物物质—DNA 结构图

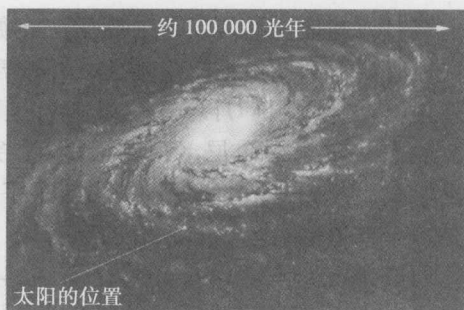


图 1-2 大尺寸的实物物质—银河系

物质存在的另一类形式是场。场没有确定的空间范围,是以连续形式存在的物质形态。与实物物质以多种形式存在一样,场物质的存在形式也是多样的,如电磁场、引力场等。场与实物一样有质量、动量、能量,一样遵循动量守恒、能量守恒等物质运动的基本规律。

场与实物的最主要的区别是:实物具有不可入性,一个实物所占据的空间不能同时为其他实物所占据。场总是弥漫在一定的空间范围,几个场可以同时存在于同一空间,并满足叠加原理;实物的运动速度不能达到光速,场的传播速度有可能为光速;实物受力可以产生加速度,而场却不能被加速;实物可以作为参考系,而场不能。

应该说物质的存在形式也是一个相对的概念,是相对今天的认识水平而言的。随着科学技术的发展,有可能发现另外的物质存在形式。

虽然物质分为实物物质和场物质,但二者又是密切联系的。首先,任何实物物质周围都存在相关的场,场是传递实物间相互作用的媒介。正是间断的实物和连续的场,构成了物质间断性和连续性的统一。其次,实验已证实场和实物可以相互转化,如电子和正电子相遇将湮灭转化为光子,即转化为电磁场;反过来,高能光子在原子核的库仑场中也可以转化为正负电子对,即转化为实物粒子。

机械运动是最简单的运动。本章主要讨论宏观物质作低速机械运动的规律，低速是相对光速而言的，按物理学科分类属于经典力学。本章将介绍伽利略（1564~1642）、牛顿（1642~1727）对经典力学的贡献；动量守恒，角动量守恒，能量守恒定律；最后介绍对宏观物质运动更一般的描述狭义相对论。

§ 1-1 经典力学的建立

中国在 15~16 世纪即明朝也曾有过资本主义萌芽，但它在中国并没有成长起来。14~16 世纪，欧洲经历了文艺复兴时期。其间由于商品经济的发展，资本主义生产关系已经在欧洲封建制度内部逐步形成，上层建筑领域也必然反映新兴资产阶级的利益和要求。当时的思潮主要是反对中世纪的禁欲主义和宗教观，在自然科学方面也有极大的发展，表现在：

一、天文学上的突破

在对地球地位的认识上，亚里士多德（前 384~前 332）、托勒密（约 90~168）创立的“地心说”长期占据统治地位，并被教会所利用。“地心说”认为，地球居于宇宙的中心静止不动，太阳、月球、行星和恒星都围绕地球运行，上帝位于宇宙的最外层。1539 年波兰天文学家哥白尼（1473~1543）突破神学的桎梏，提出“日心说”，对“地心说”提出挑战。“日心说”认为，太阳处于宇宙中心，地球和其他行星都围绕太阳运动，地球只是一个普通的行星。意大利的布鲁诺（1548~1600）为宣传“日心说”被宗教裁判所判处死刑烧死在罗马。1492 年哥伦布（1446~1506）发现美洲大陆，1519~1522 年麦哲伦（1480~1521）船队完成环球航行，为地圆说提供了无可辩驳的事实。17 世纪德国天文学家开普勒（1571~1630）总结出行星运动的三大定律。

二、经典力学的诞生



图 1-3 伽利略（1564~1642）

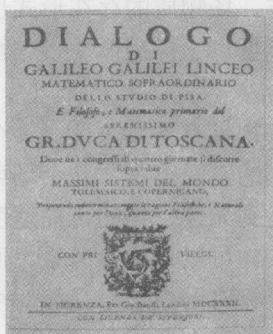


图 1-4 伽利略名著《两大世界体系对话》扉页(1632)

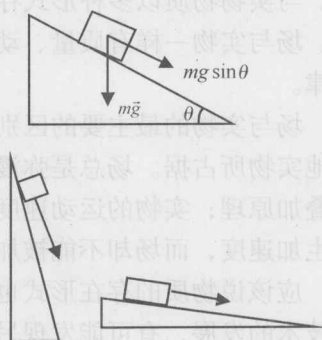


图 1-5 斜面实验示意图

意大利科学家伽利略（1564~1642）是开普勒的同时代人。他从物理学的角度支持“日心说”，晚年因宣传“日心说”受到教会迫害，遭终身监禁。1979 年，梵蒂冈罗马教

皇J·保罗二世代表罗马教廷为伽利略平反，认为教廷在 300 多年前对他的迫害是严重错误。伽利略被称为“近代科学之父”，成就之一是倡导了数学与实验结合的研究方法。他设计了斜面实验，证明沿斜面下滑的物体作加速运动，其加速度与重量无关；还发现斜面越陡加速度越大，在极限情况下斜面垂直，自由下落物体的加速度是一样的；当斜面完全水平时，加速度为 0，这时运动物体就应该沿直线永远运动下去，从而实现了不靠外力维持的“惯性运动”。伽利略逐步明确了“加速度”的概念。他对力学相对性原理的思考留下了“伽利略变换”这一宝贵遗产。伽利略的上述贡献，为经典力学的建立铺平了道路。

牛顿（1642~1727）杰出的英国科学家。从个体来讲，牛顿也许是有史以来最伟大的天才。1686 年，牛顿发表名著《自然哲学的数学基础》，在开普勒、伽利略观测实验的基础上，给出万有引力定律和被称为牛顿三定律的力学定律，建立了经典力学基本体系，因而人们也习惯地称为牛顿力学；在数学上他与莱布尼兹差不多同时发明了微积分，建立二项式定理；在光学方面他致力于色散现象和光本性研究，发现白光是由不同波长的光波组成，1675 年观察到牛顿环，主张光的微粒说，还创制了反射式望远镜。一个人只要拥有上面的任一项成就则足矣，而牛顿拥有了全部。

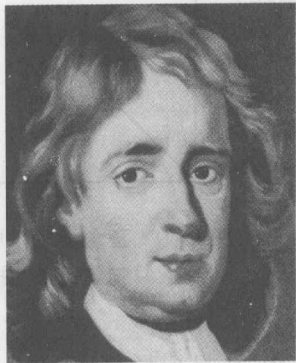


图 1-6 牛顿（1642~1727）

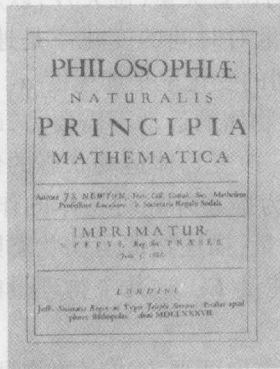


图 1-7 牛顿名著《自然哲学的数学原理》扉页(1686)

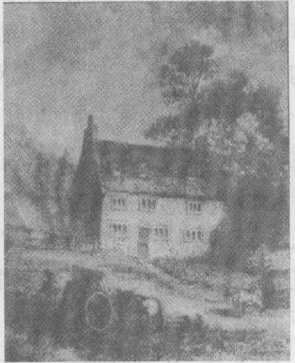


图 1-8 牛顿出生地

§ 1-2 经典力学对物体运动的描述

一、经典力学的时空观

自古以来,空间的概念来源于物体的广延性,时间的概念来源于过程的持续性。

为了描述物体的运动,必须指明物体是相对于什么物体而运动,被选为参考的物体称为参考系。

经典力学认为空间和时间是与任何物体及其运动无关的,存在绝对空间和绝对时间。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中说:“绝对空间,就其本性来说,是与任何外在的情况无关的,始终保持着相似和不变。”“绝对的、纯粹的数学的时间,就其本性来说,均匀地流逝而与任何外在的情况无关。”

二、时间和空间测量的单位

时间表征物质运动的持续性。1967 年第 13 届国际计量大会决定,以零磁场下铯 133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁频率作为国际通用的频率标准,定义与它相应的电磁波持续 9 192 631 770 个周期为 1 秒。

空间反映物质运动的广延性。空间两点的距离为长度。人类选择与自身大小相适应的“米”作为长度的基本单位。1983 年第 17 届国际计量大会定义,米是光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒时间间隔内运行路程的长度。

三、对物体运动的描述

前面提到,为描述物体运动需选择参考系。我们把牛顿运动定律适用的参考系称为惯性参考系,且相对于一惯性系作匀速直线运动的其他参考系都是惯性系。地球是很好的惯性系。牛顿运动定律不适用的参考系称为非惯性系。

在参考系上固连一坐标系(如图 1-9 取直角坐标系),从坐标原点到质点所在位置的有向线段为位置矢量(位矢) $\boldsymbol{r}$,以定量描述物体相对参考系的位置。位置矢量对时间的变化率是速度 $\boldsymbol{v}$,速度的大小称为速率 v 。速度对时间的变化率是加速度 $\boldsymbol{a}$ 。

伽利略用斜面实验证明,保持物体的运动不需要力,改变物体的运动状态才需要力(惯性定律)。改变物体运动状态的作用是来自物体以外的环境——外界。为描述外界对物体的作用,我们引入力 $\boldsymbol{F}$,冲量 $\boldsymbol{I}$,功 W 三个物理量;描述物体运动状态则对应地用三个物理量加速度 $\boldsymbol{a}$,动量 $\boldsymbol{P}$,能量 E 。这几个物理量的定义将在下面给出。

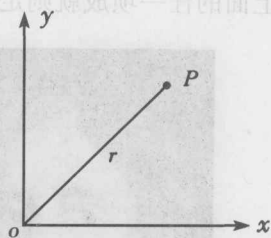


图 1-9 直角坐标系中对物体运动的描述

$\boldsymbol{F}, \boldsymbol{I}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{P}$ 是矢量,即大小和方向两要素决定的物理量。 W, E 是标量,只有大小。矢量的印刷体用黑体表示如 $\boldsymbol{F}, \boldsymbol{I}$,手写用 $\vec{\boldsymbol{F}}, \vec{\boldsymbol{I}}$ 表示。

例题 1-1 将一球从屋顶以 10m/s 速度下抛,求球下落 2s 后的速度及 2s 内下落的距离。

解 匀加速直线运动的有关公式在中学都已讲过。离手后小球作加速度为重力加速度 g 的匀加速直线运动,取抛出点为坐标原点,向下为 y 轴正向,于是球下落 2s 后的速度为

$$v = v_0 + gt = 10 + 9.8 \times 2 = 29.6\text{m/s}$$

2s 内下落的距离为

$$y = v_0 t + \frac{1}{2} gt^2 = 10 \times 2 + \frac{1}{2} \times 9.8 \times 2^2 = 39.6\text{m}$$

§ 1-3 牛顿三定律

牛顿三定律是经典力学的基本定律。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中给出三定律:

第一定律:任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态,直到其他物体的作用迫使它改

变这种状态为止。在此给出了力的定义:力是外界对物体的一种作用,是使物体速度发生改变的原因。给出惯性是物体保持静止或匀速直线运动状态的特性。

第二定律:物体受到外力作用时,物体所获得的加速度的大小与合外力的大小成正比,并与物体的质量成反比;加速度的方向与合外力方向相同。写为

$$F = ma$$

式中 a 表示物体在合外力 F 作用下获得的加速度, m 表示其质量(将在 §1-5 中讨论)。

第三定律:当物体 A 以力 F_1 作用在物体 B 上时,物体 B 也必定同时以力 F_2 作用在物体 A 上, F_1 和 F_2 在同一直线上,大小相等,方向相反。写为

$$F_1 = -F_2$$

牛顿三定律只在惯性系成立,研究对象是单个物体。

§1-4 万有引力定律

牛顿在前人工作基础上,运用类比、简化模型的方法提出万有引力定律。

一、万有引力定律的建立

开普勒经过 16 年的研究,归纳出行星运动的三定律:

1. 行星作椭圆轨道运动,太阳位于椭圆的一个焦点上。
2. 太阳到行星的矢径(太阳到行星的有向线段)在相等的时间内扫过相等的面积。
3. 行星绕太阳的椭圆轨道的半长轴 a 的立方与它绕太阳的周期 T 的平方成正比,即

$$\frac{a^3}{T^2} = k$$

其中 k 与行星的性质无关,是太阳系的常数。

在开普勒全面解决行星运动规律之后,面临的问题是“为什么行星会保持在轨道上?”“为什么行星会这样运动?”开普勒已经注意到这些问题,他意识到这种运动一定是外界对物体的作用——力产生的,但牛顿最终悟出其中奥秘。

广为流传的是牛顿的“苹果落地故事”。1666 年牛顿为躲避瘟疫回到故乡。一天他坐在花园里,忽然看到一个苹果从树上落下,他吃了一惊,便沉浸在引力问题的思考中。事实上,那段时间他一直思索着月亮绕地球运行却为什么掉不下来。苹果落地,激起一个伟大的、有准备的科学家的灵感,牛顿以他非凡的洞察力在落体运动与月亮运动之间架起智慧的桥梁,将天上天体的运动与人间的落体运动统一了。

如图 1-10,在高塔上沿水平方向抛出一石块,石块将沿向下弯曲的曲线(抛物线)运动最终落在地面上。伽利略已经指出,保持物体运动不需要力,物体运动的改变才需要力。石块由抛出时的沿水平方向运动改变为不断弯向地面,表明石块运动状态在不断改变,因而石块在运动过程中必受到外界对它的作用力。牛顿把地球对石块的作用归结为地球的引力。那么,与地球相近的月亮也受到地球引力作用为什么不掉下来呢?牛顿进一步思索了石块

的运动。设想,若石块抛出时的水平速度 v_0 值加大,那么石块落地位置与抛出点的水平间距 l 加大,这样抛物线的弯曲程度就会变小。如果石块运动曲线的弯曲程度正好与地球表面一致,那么石块永远不会落到地面上。

牛顿把月亮比作抛体(用了类比的方法)。如果月亮没有受到地球引力的作用,月亮应该作匀速直线运动。由于地球引力的作用,使月球离开直线不断偏向地球,且其运动曲线的弯曲程度恰好与地球表面的弯曲程度相同,所以月亮永远不会落到地球上。

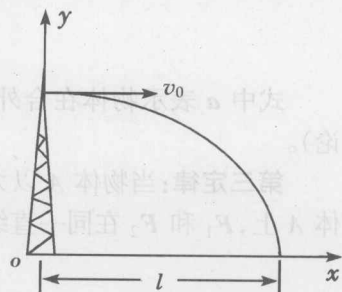


图 1-10 地球上石块的抛体运动

二、万有引力定律

这种引力的表达式是什么? 牛顿想到了开普勒定律。

如果把行星的运动简化为绕太阳作匀速圆周运动(在此牛顿用了简化模型)。以速率 v 在半径为 R 的圆周上运动的行星,必受到向心力 F 作用, F 产生的向心加速度 a 满足

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

式中 T 是行星的运动周期。于是在半径为 R_1 、 R_2 的轨道上运动,周期为 T_1 、 T_2 的两行星向心加速度之比为

$$a_1 : a_2 = \frac{4\pi^2 R_1}{T_1^2} : \frac{4\pi^2 R_2}{T_2^2} = \frac{R_1 T_2^2}{R_2 T_1^2}$$

按开普勒第三定律,行星绕太阳运动周期的平方与它到太阳距离的立方成正比

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

将此式代入上式得

$$a_1 : a_2 = R_2^2 : R_1^2$$

表明在不同轨道上运动的两行星加速度大小之比与距离的平方成反比。又从 $F = ma$ 得出产生向心加速度的向心力不是别的,就是两行星间的万有引力,且是与距离平方成反比的力。牛顿后来又证明,此结论对椭圆轨道也适用。

牛顿在阐明了引力与距离的平方关系后,考虑到伽利略给出的结论:地球上任何物体不论其轻重都有同样的加速度 g ($=9.8$ 米/秒²)。根据 $F = mg$ 得出物体所受地球引力与物体质量成正比。据牛顿第三定律,物体对地球的引力应与地球对物体的引力相等,因此物体对地球的引力也应与地球的质量成正比。由此推出万有引力定律:任何天体(也包括物体)间的引力大小与两天体间距离的平方成反比,与两天体质量乘积成正比,引力的方向沿二者连线指向对方,大小可以写为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

式中 m_1 、 m_2 分别为两天体质量, R 为两者间距离, G 为引力常数。100 年后,英国物理学家卡文迪什(1731 ~ 1810)用扭秤实验测出

$$G = 6.672\ 6 \times 10^{-11} \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{千克}^2$$

1986 年国际科学联盟理事会科技数据委员会推荐值为

$$G = 6.672\ 59(85) \times 10^{-11} \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{千克}^2$$

三、实验验证

万有引力定律建立后,用以准确地预言了彗星的出现、海洋潮汐等。但 18 世纪末 19 世纪初,人们在用来计算天王星轨道和位置时出现了偏差。难道万有引力定律不能解释天王星的运动吗?

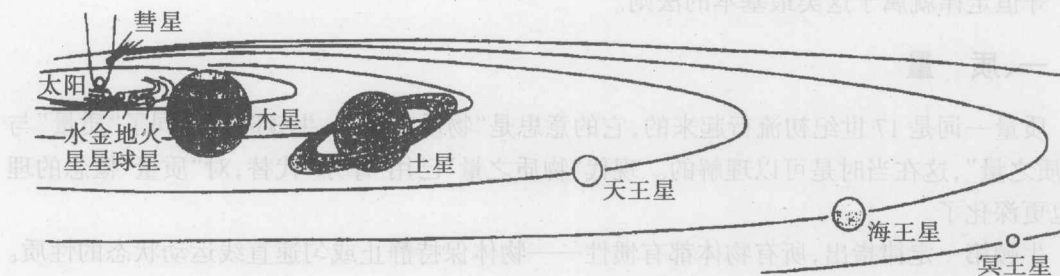


图 1-11 太阳系的九颗行星

1781 年英国天文学家赫歇耳(1738 ~ 1822)用自制的望远镜发现了天王星,天王星的发现突破了土星是太阳系边界的思想,因而联想到天王星也未必是太阳系的边界,很可能在天王星外面还有一颗未知的新行星,新行星的引力使天王星的轨道和位置时出现了偏差。1845 年英国剑桥大学的学生亚当斯计算出未知行星的轨道和质量,并把计算结果交给格林威治天文台,但他的成果没引起重视,导致新行星从格林威治天文台天文学家的望远镜中溜走了。1846 年 6 月,法国青年勒维斯也计算出新行星的轨道,他把结果寄给柏林天文台。幸好在收到这封信的晚上,台长伽勒手边有一幅有助于寻找该星的星图,他在非常靠近预言位置的天区找到了这颗新星。1846 年 9 月 18 日伽勒给勒维斯回信说:“先生,你给我们指出位置的新行星是真实存在的。”新行星被命名为海王星。这个被誉为“笔尖上的发现”不仅解决了天王星的轨道问题,也证明了牛顿运动定律和万有引力定律的正确。后来美国天文学家洛威耳和波克林根据类似的计算预言海王星之外还有一颗新行星。1930 年汤博在照片中发现了它并命名为冥王星。至此发现了太阳系的九颗行星。

例题 1-2 如果地球到月球的距离为 250km,地球到太阳的距离为 $9.3 \times 10^7 \text{m}$,地球的质量取 $6 \times 10^{24} \text{kg}$,太阳的质量取 $2 \times 10^{30} \text{kg}$,试近似计算太阳对月球的吸引力与地球对月球的吸引力之比。

解 考虑到地球到太阳的距离比月球到地球的距离大得多,可以近似地认为太阳到地球的距离 R_{se} 等于太阳到月球的距离 R_{sm} 。

太阳对月球的吸引力

$$F_{sm} = G \frac{m_m m_s}{R_{sm}^2}$$

地球对月球的引力

$$F_{em} = G \frac{m_m m_e}{R_{em}^2}$$

$$\frac{F_{sm}}{F_{em}} = \frac{m_s R_{em}^2}{m_e R_{sm}^2} = \frac{2 \times 10^{30} \times (250 \times 10^3)^2}{6 \times 10^{24} \times (9.3 \times 10^7)^2} = 2.4$$

§ 1-5 动量守恒定律

世界是变化的,但是变化遵循一些最基本法则,是这些最基本的法则支配着世界的变化。守恒定律就属于这类最基本的法则。

一、质 量

质量一词是 17 世纪初流行起来的,它的意思是“物质之量”。牛顿时代混同了“质量”与“物质之量”,这在当时是可以理解的。现代“物质之量”已用“摩尔”代替,对“质量”概念的理解也更深化了。

牛顿第一定律指出,所有物体都有惯性——物体保持静止或匀速直线运动状态的性质。从牛顿第二定律

$$F = ma$$

看出,在相同外力作用下质量越大物体产生的加速度越小,即物体运动状态越难改变。换言之,质量越大的物体其惯性越大。所以物体质量是惯性大小的量度。从牛顿第二定律定义的质量称为物体的惯性质量 $m_{\text{惯}}$ 。

万有引力定律中也涉及到物体质量。万有引力定律

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

表明物体间引力的大小与两物体质量乘积成正比,与物体间距离平方成反比,即在施力物体相同、相互距离相等的条件下物体所受力的大小与物体质量成正比。在这里,物体的质量又度量了物体所受万有引力的强弱。从万有引力定义的质量称为物体的引力质量 $m_{\text{引}}$ 。

物体的惯性质量和引力质量是从不同物理现象分别定义的,但二者密切相连。设物体受地球引力在地球表面运动,有

$$F = G \frac{m_e m_{\text{引}}}{R^2} = m_{\text{惯}} g$$

式中 m_e 是地球的质量, R 是地球的半径。

可得重力加速度

$$g = \frac{G m_e}{R^2} \frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}}$$

伽利略已经证明,地球上任何物体的加速度都是相同的,即对所有物体 g 相同,而 G 、 m_e 、 R 又是一些常量,故