

# 文科

(第二版)

# 物理

何国兴 张铮扬 编著

WENKE WULI

東華大學出版社

# 文科物理

(第二版)

何国兴 张铮扬 编著

東華大學出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

文科物理 / 何国兴, 张铮扬编著; —2 版. —上海: 东华大学出版社, 2015. 9  
ISBN 978-7-5669-0870-4

I. ①文… II. ①何… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 179596 号

责任编辑: 竺海娟

封面设计: 魏依东

## 文科物理

Wen Ke Wu Li

编 著: 何国兴 张铮扬

出 版: 东华大学出版社 (上海市延安西路 1882 号 邮政编码: 200051)

本 社 网 址: <http://www.dhupress.net>

天猫旗舰店: <http://dhdx.tmall.com>

营 销 中 心: 021-62193056 62373056 62379558

印 刷: 常熟大宏印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 22

字 数: 770 千字

版 次: 2015 年 9 月第 2 版

印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5669-0870-4/O·024

定 价: 58.00 元

## 内容简介

《文科物理》(第二版)以提高学生科学素质、培养学生科学思想、科学方法、科学精神为目的,介绍物理学基本知识以及物理学在现代高新技术中的应用,强调物理学与人文学科的关系,特别采用美学观审视物理概念、物理规律和物理研究方法,同时结合物理史介绍著名物理学家的科学和美学思想方法,一丝不苟的科学态度及勇于探索、敢于突破、善于发扬的创新精神。全书编写力求深入浅出,集专业性与通俗性、科学性与美学性于一身,图文并茂,并附有一定的习题。

本书主要读者对象是人文、管理、经济、艺术等文科学生,也适合非物理学专业理工科学生的阅读,也可作为一般读者了解现代科技与物理学关系的参考读物。

# 前 言

物理学研究宇宙间物质存在的基本形式，物质的性质、运动、相互作用、相互转化以及内部结构的基本规律，是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。物理学是研究“物”的，它研究的是物质，也就是研究宇宙间客观存在的物质。物理学不是对客观存在的物质的运动简单地进行记载和现象描写。而是研究“物”的“理”，也就是研究物质运动的道理，研究物质运动的普遍的基本规律。所以，物理学是自然科学与技术的基础。同时，物理学也是人类思想文明的源泉，它既是一门科学，也是一种文化。由于物理学的研究对象是最普遍的，所研究的规律是最基本的，与人文科学之间的沟通和渗透越来越明显和广泛，许多人文、社会、管理、经济、艺术等领域的问题往往借用物理学的概念、思想、方法来处理，因此，当代社会对文科生科学素质的要求也就越来越高。在西方，如果一个人未读过莎士比亚的著作，会认为没有教养；如果一个人不知道牛顿、爱因斯坦的理论，同样也会认为没有修养。著名理论物理学家惠勒说过：“今天谁不知道高斯分布或者熵概念的意义和范围，谁就不能被认为是科学上的文化人；同样可以相信，明天谁不熟悉分形，谁也将不能被认为是科学上的文化人。”有人曾对全部诺贝尔经济学奖获得者的学历作过统计，发现他们中间超过半数的人都有数学和物理学的学历背景。如今，美国已有数百名物理学博士正在从事量化经济学的工作，而且深受华尔街的欢迎。所以有人说：“如果今天爱因斯坦还年轻，他可能就在华尔街工作。”

《文科物理》（第二版）正是根据时代的需要，为人文、管理、经济、艺术等高校文科学生学习物理学而编写的教材。但它不是理工科学生所用的物理学教材的简写本，而是专门为具有文化特色的课程设计的。根据文科学生的特点，本书以提高文科学生科学素质，培养学生科学思想、科学方法、科学精神为目的，介绍物理学基本知识以及物理学在现代高新技术的应用，强调物理学与人文学科的关系。本书力求从物理实验事实和物理发展史实出发，具体地引入物理概念，并深入揭示物理概念的内涵，使读者对物理概念的形成、发展、演变过程有较全面的理解。特别是通过介绍历史上一系列不同物理学说之争，使读者有身临其境的参与感，而且从正反两方面的对比中更加加深对概念的理解，有利于从理性思维的高度把握物理学的发展。加强对近代物理和高科技内容介绍是本书的又一特点，通过对物理学前沿进展的适当介绍，使读者了解相对论的时空观、现代物质观和宇宙观，有助于培养学生辩证唯物主义的哲学思想、树立科学的世界观。本书注意分析物理学中学术思想发展的历史脉络，尽可能切实地反映物理思想发展中的各个里程碑阶段，揭示科学发展的历史规律。本书将物理史上一系列重大发现作为“案例”进行了剖析，通过介绍物理学家探索的历程，分析他们的研究思路、创造性工作特点以及所用的研究方法，使读者清晰地看到科学发展的曲折和艰难，并从中吸取科学家们成功的经验和失败的教训，获得

科学方法论的教益与启迪，进而培养一丝不苟的科学态度，勇于探索、敢于突破、善于发扬的创新精神。本书注重物理学与社会、经济和管理等人文学科的关系，特别采用美学观审视物理概念、物理规律和物理研究方法。全书编写力求深入浅出，集专业性与通俗性、科学性与美学性于一身，图文并茂，并附有一定的习题。

本书融会了编者多年来从事物理教学的经验 and 教改的成果，同时借鉴了国内外物理教材和物理学史的成果，编者在此对他们表示衷心的感谢。最后，对不幸病故的编者之一张铮扬副教授表示深切怀念。

编 者

于东华大学

2015年7月

# 目 录

<b>第一章 经典力学与混沌</b> .....	1
1.1 绝对时空观 .....	1
1.2 万有引力定律 .....	3
1.3 经典力学 .....	12
1.4 守恒律 .....	21
1.5 混沌 .....	42
习题 .....	48
<b>第二章 电磁学与电磁波</b> .....	49
2.1 电磁学发展简史 .....	49
2.2 静电学与静磁学 .....	53
2.3 电磁感应定律 .....	55
2.4 电磁波应用 .....	67
习题 .....	90
<b>第三章 光学与光学信息技术</b> .....	91
3.1 几何光学 .....	93
3.2 波动光学 .....	94
3.3 光学信息技术 .....	100
习题 .....	123
<b>第四章 热学与熵</b> .....	124
4.1 热力学第零定律与热平衡 .....	124
4.2 热力学第一定律与能量守恒定律 .....	126
4.3 热力学第二定律与熵 .....	131
4.4 热力学第三定律与绝对零度 .....	141
4.5 分子运动论与布朗运动 .....	147
习题 .....	151

<b>第五章 相对论与宇宙观</b> .....	152
5.1 狭义相对论 .....	152
5.2 广义相对论 .....	162
5.3 现代宇宙观 .....	168
习题 .....	191
<b>第六章 量子论与物质观</b> .....	192
6.1 19 世纪末物理学的三大发现 .....	192
6.2 量子论和量子力学的诞生 .....	200
6.3 激光 .....	246
6.4 核物理与核技术 .....	251
6.5 粒子物理学与粒子标准模型 .....	267
6.6 纳米技术 .....	278
习题 .....	293
<b>第七章 物理学与美</b> .....	294
7.1 经典力学的简单与和谐美 .....	294
7.2 热力学理论体系的美学因素 .....	300
7.3 完美雅致的经典电磁学理论 .....	302
7.4 相对论与美 .....	306
7.5 原子王国中的美学追求 .....	312
7.6 量子力学的美学评价 .....	315
7.7 统一场论的美学观 .....	321
7.8 混沌之美 .....	327
习题 .....	342



# 第一章 经典力学与混沌

## 1.1 绝对时空观

运动是我们这个世界最主要的特点之一，它也是最容易引起我们注意的现象。在处理运动问题时，我们需要哪些最基本的概念呢？很显然需要空间与时间的概念，以及对其度量的参考坐标。我们每个人都具有空间与时间的常识，但是因为这些概念实在太基础，以致我们很难用其他更简单的概念来定义它们。因此，在这里我们要简单地复习和讨论一下这一物理学的舞台，即时间与空间。

### 1.1.1 时间与空间

我们每个人对时间和空间的直觉很像牛顿的“绝对”空间和时间。按照牛顿的看法，空间是绝对的，它的意思是空间的存在是永恒的，与空间里是否有物质存在毫无关系。因此，空间就像一个静止的空格，在这一空格里我们可放一些物体，而当物体在此空间内运动时，与空间并没有相互作用的存在。在宇宙中每一物体都是在某一时刻占据空间内的某一地方，当一个物体在运动时，其位置便随时间连续变化。空间内两点的距离可用标准米尺度量它，这些度量的结果与欧几里德几何大致相符合。例如空间内两点间最短的连线是直线，或者空间内任意三角形的内角之和为 $180^\circ$ 。因此，我们假设我们所处的空间是欧几里德空间。

根据牛顿的看法，时间也是绝对的。时间一直向前“流去”，与物体的存在以及物理现象的发生毫无关系。我们无法降低或加快时间流动的速度，并且在宇宙中任何一个地方时间流动的情形都是相同的。因此在我们地球上一秒钟的间隔和其他星球上一秒的间隔是完全相等的，不管这些星球间是否有相对速度的存在。也就是说，如果我们将两个经校正的同步时钟放在不同的地点，或者不同的星球上面，这些时钟的读数应当永远是相同的。

上面所讲的时间与空间虽然是毫无关联存在着。但是，如果我们把物体牵涉到里面，时间便似乎与空间有点关系，因为我们无法想象一个物体存在于空间内而不占据一段时间，或者一个物体存在一段时间但并不占据空间内某一位置。

前面这三段话是用日常生活的常识概念来表示时间与空间的性质。虽然这些直觉的概念似乎很正确，不过在以后我们讨论相对论时，将看到由这些概念推演出来的一些结论是与经验或与实验相冲突的。这是因为我们在叙述这些直觉的时空概念时，曾做了一些极基本的假设，即空间是欧几里德空间，并且时间与空间毫无关联。在物理学中一个基本假设的正确与否，唯一判断的方法是实验。

现在让我们更严密地，更科学地叙述时间与空间的概念。我们知道物理学及其他自然

科学都是建立在实验的基础上。因此，物理学家定义一个概念时是基于数量的度量，以及度量的方法，而不只是根据字典上的定义。例如在定义长度或空间间隔的概念时，我们只叙述一把米尺使用的步骤，以及如何复制另一把良好的标准米尺，以便每个人所量得的数据都是相同的。因此，在物理学上一个物体的长度的概念只是以一标准米尺用特定的方法比较或度量出来的且有一定单位的数字。时间的定义也是和长度的定义一样，我们说时间间隔几分钟或几秒钟便牵涉到如何做一个标准钟，以及如何用这一标准钟去度量时间。所以时间只是依照特定的方法用标准钟量出来的具有单位的数字。

这种操作的定义法可能会令各位感到很失望，因为我们并未回答“什么是时间？”“什么是空间？”，我们所告诉你的只是如何去度量它们。但是，假设没有这种有用的实验的定义法，科学不可能在仅仅几个世纪内就有这么伟大的成就。美国有一位物理学家兼哲学家布里奇曼曾说过：“一个名词的真谛只能从人们如何用它看出来，而不在乎人们如何叙述它。”这便是科学定义一个名词时所抱的态度。即使我们都像科学家一样采用这种极其有效的方法，也不妨碍我们欣赏诗人、艺术家和作家对宇宙的不同看法。

时间单位是秒。随着科学技术的发展，秒的定义曾做过三次重大的修改。最早，人们是利用地球自转运动来计量时间的。基本单位是平太阳日。19世纪末，将一个平太阳日的 $1/86400$ 作为一秒，称作世界时秒。由于地球的自转运动存在着不规则变化并有长期减慢的趋势，使得世界时秒逐年变化，不能保持恒定。因此，按此定义复现秒的准确度只能达到 $1 \times 10^{-8}$ 。1960年国际计量大会决定采用以地球公转的运动为基础的历书时秒作为时间单位，即“将1900年初附近，太阳的几何平黄经为 $279^{\circ}41'48''04$ 的瞬间作为1900年1月0日12时整，从该时刻起算的回归年的 $1/31556925.9747$ 作为一秒”。按此定义复现秒的准确度提高到 $1 \times 10^{-9}$ 。1967年国际计量大会决定采用原子秒定义取代历书时秒定义。即“秒是铯133原子基态的两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射的 $9192631770$ 个周期所持续的时间”。按此定义复现秒的准确度已优于 $1 \times 10^{-13}$ ，图1-1-1为中国计量科学研究院铯原子束时间频率基准装置。



图 1-1-1 中国计量科学研究院铯原子束  
时间频率基准

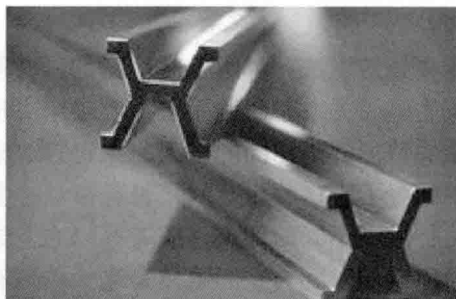


图 1-1-2 1889 年的国际米原器

国际上对长度基准“米”的定义已作过三次规定：第一次，1889年，第一届国际计量大会通过：将保存在法国的国际计量局中铂铱合金棒在 $0^{\circ}\text{C}$ 时两条刻线间的距离定义为 $1\text{m}$ ，称为长度的实物基准（图1-1-2）。长度的实物基准难以保证不随时间变化，也难防止意外（如被战争，地震或其他灾害所毁坏）。物理学家早就想到用长度的自然基准来代替实物基准。第二次，1960年，第十届国际计量大会决定用氪86原子的橙黄色光波来定义“米”，规定米为这种光的波长的 $1650763.73$ 倍。第三次，1983年，第十七届国际计量大

会通过：米是光在真空中  $1/299792458$  s 的时间间隔内运行路程的长度。（规定真空中光速值  $c=299792458$  m/s。）

### 1.1.2 参照系与惯性系

所谓参照系是固连于参照体的坐标系。任何一个物体在空间的位置只能相对地确定，物体在空间的位置随时间的变化，也只具有相对的意义。因此，在研究物体间的相对位置的变化时，必须事先选定某一个物体，以便确定其他物体相对于这个物体的位置的变化。这个被事先所选定的物体称为参照体。如果对于某个参照体而言，物体在空间的位置随时间而变动，则说物体相对于这个参照体是运动的，否则是静止的。一般地说，任何一个物体都可选为参照体，但是，一个物体的运动对于不同的参照体可表现为不同的运动。例如，一个被固定在运动着的车厢内的物体，当把车厢取为参照体时，物体相对于车厢是不动的；但当把地球取为参照体时，物体相对于地球则与车厢以相同的轨迹和速度运动着。因此，只有在选定参照体的情况下，才能明确地说明物体的运动情况。通常，在日常生活和工程实际中人们都选地球为参照体。

物体的运动性质和规律，却与采用怎样的空间和时间来度量它有着密切的关系。相对于绝对空间的静止或运动，才是绝对的静止或运动。只有以绝对空间作为度量运动的参照系，或者以其他作绝对匀速运动的物体为参照物，惯性定律才成立。即不受外力作用的物体，或者总保持静止，或者总保持匀速运动。这一类特殊的参照系，被称为惯性参照系。

参照系可分为惯性参照系和非惯性参照系两类。一切惯性参照系都是等效的，它们可以相互转换。因此，为了研究的方便，对同一物体在不同条件下运动可以选用不同的参照系。例如从地面上发射火箭到月球上，在发射的初期，地球引力起主要作用，可采用地心参照系计算；发射中途，地球、月亮的引力的影响都不能忽略时，可采用地月系的质心（即质量中心，是表征质点系质量分布的一个几何点）参照系处理；当绕月转动时，可采用月心参照系处理。又如处理在加速器中运转的被加速粒子，一般采用实验室参照系处理；但当这粒子撞击靶上的原子核时，则应当采用质心参照系处理。

## 1.2 万有引力定律

引力定律是经典力学的重要基础，是人类历史上第一次发现的物质间的相互作用定律，也是人类科学认识史上的一座丰碑。它在研究宏观世界物质运动规律中具有举足轻重的地位，在物理学、天文学、宇宙学、航天技术等科学技术领域有着广泛的应用，成为人们认识和改造世界强有力的理论武器。正因为如此，它的发现是科学史上震撼人心的一个重大事件。

古希腊哲学家亚里士多德（图 1-2-1）认为：地球是宇宙的中心，是绝对静止不动的，天体绕地球运动，这种运动是神力所驱使的；力与运动相联系，作用于物体上的力一旦终止，物体就随即静止。他还认为，宇宙是不均匀的，是中心对称的，地球是圆球形的。后来，古希腊的托勒密用对称点、圆周运动、偏心本轮三个概念解释天文观测，形成了完整的“地心说”和关于运动和力的逻辑

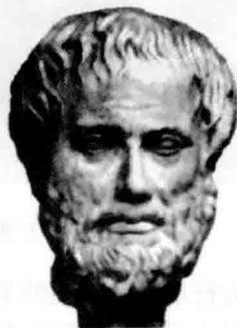


图 1-2-1 古希腊哲学家  
亚里士多德

体系。黑暗的中世纪，神学与亚里士多德——托勒密学说相结合，严重地阻碍甚至扼杀了科学的进步。

16世纪，欧洲文艺复兴，波兰哥白尼的《天体运行论》（图1-2-2）在1543年发表。他认为：如果将参照系从地球移到太阳，就会产生与观测相符合的最简单最和谐的天体几何学；数学关系越简单就越接近自然界的真实解释。哥白尼的“日心说”的重要意义在于：他走出了科学进程中最困难的一步。将地球从宇宙中心降到了普通行星的地位，摧毁了地球至尊、人类至上的思想，冲击了人们对基督教义的信仰，是向神学的宣战书；在自然科学领域，他找到了描述天体运动的近似的惯性系，显示了太阳参照系的优越地位，并指明旋转运动是天体“固有的性质”，从而为以简单明了的形式描述支配天体运动的自然规律的发现创造了条件，为牛顿力学的发展开辟了道路。

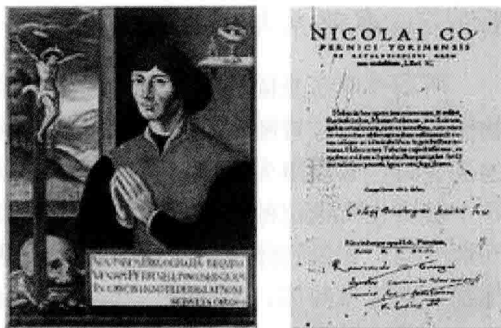


图1-2-2 哥白尼的《天体运行论》

天体的运动规律如何，是什么力使天体作有规律运动的？地上的物体是如何运动的？它们的运动规律又是什么力驱使的？17世纪初，摆在人们面前的这些课题的研究，导致了万有引力定律的发现。

### 1.2.1 开普勒行星运动三定律的发现

德国天文学家、物理学家开普勒（图1-2-3），从小体弱多病，患过天花，视力很差，家境贫寒，但聪明好学才华出众，因此得到外界帮助，于1589年进入杜宾根大学神学系学习。天文学教授麦斯特林对他影响很大，使他对天文学、数学产生了浓厚的兴趣，并奠定了坚实的科学基础。更为重要的是，他从自己老师那里得知了哥白尼学说，成为哥白尼学说的坚决支持者。因此，开普勒失去了在教会任职的机会。1599年，开普勒将自己写的《宇宙的秘密》一书寄给了当时在布拉格的丹麦天文学家第谷，请求指教。第谷十分赞赏开普勒的见解，并回信邀请他一起工作，年轻的开普勒成了第谷的助手。1601年，第谷临终前将自己25年中观测得到的约750颗星球的资料、数据、图表全部交给了开普勒，希望他能完成天文观测和研究事业。

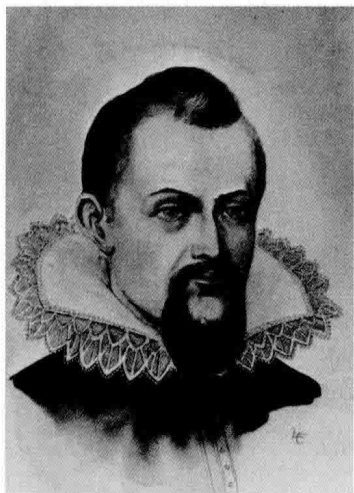


图1-2-3 开普勒

开普勒的研究工作是从整理和研究星体运行的大量观测资料、数据开始的。由于火星的数据最多，他将火星选为行星绕日运动的突破口。起初，他按照传统观念将行星轨道看作圆，计算的结果与第谷对火星位置观测的数据差了 $8'$ 。这是不大的差数。但是，细心的开普勒非常注重这 $8'$ 之差，因为他深知第谷观测的准确性， $8'$ 远远超过了第谷的观测误差。精心的研究，使他得到了行星运行轨道的正确答案。

1609年,开普勒发表了《关于火星运动》的文章。文中说:“如梦方醒一样,一盏灯照亮了我的心头,若把太阳放在椭圆的一个焦点上时,第谷的观测是那样的令人满意。”同年,开普勒写了《新天文学》一书,将火星运动规律加以推广,得到了行星运动的第一定律、第二定律。这两个定律就是:每个行星都在自己的椭圆轨道上运行,太阳恰好位于椭圆的一个焦点上;行星在近日点运动较快,在远日点运动较慢,行星的动径在相等的时间内扫过的面积相等。前者指明了行星运行轨道形状及行星与太阳间的位置关系,后者指明了行星绕日运动中角动量守恒。发现这两个定律之后,开普勒感触很深,他说:“仅仅8'之差,就引导我们走向了天文学彻底改革的道路。”

开普勒不满足已经取得的成就,他从第二定律看出,行星运动速度与行星距太阳远近有关,联想到行星运动周期也应与到太阳的距离有关。他将当时已知行星的运动周期及到行星太阳的距离,以地球为基准列出一个数据表,经过计算与比较,得到了行星运动第三定律。1619年,开普勒发表了《宇宙的和谐》一书,书中指明:行星公转周期的二次方与它同太阳平均距离的三次方成正比。这就是他所说的宇宙和谐定律,即行星运动第三定律。至此,太阳系内行星运动规律完全被揭示出来。辛勤的劳动换来了丰硕的科研成果,开普勒感受到了长期艰苦奋斗后的欣慰,正像他自己所说的那样:“经过长期艰苦工作以后,利用第谷的观测数据,发现了真正的关系。……17年来,我对第谷的数据所进行的艰巨的劳动,目前研究的结果与我最初梦想的目标是如此一致,顿然克服了我心中巨大的阴影。”

开普勒行星运动三定律,为以后的天体运动的研究提供了运动学的理论基础,为万有引力定律的发现提供了实验依据。在探索行星运动规律的艰辛征途中,开普勒突破了行星作圆周运动的传统观念。在了解了行星怎样运动之后,进一步探索行星“为何这样运动”。他想到了,使行星运动的力来自太阳。他曾设想:太阳发射的磁力流像轮辐一样在黄道上绕太阳运转,磁力流沿切线方向推动行星绕日运动。开普勒在1609年已初步具有引力思想,并认为月球是海洋潮汐的起因,后来曾提出力是产生加速度的原因。若将这些正确的思想认识与寻找天体运动的力结合起来,就非常接近于发现万有引力定律。但是,这些刚刚萌发的新思想在强大的传统观念——“力与速度相联系”面前尚未站稳脚跟,这一传统观念仍在他的脑海中占优势,致使他在寻找天体运动的力时,找错了方向。

### 1.2.2 落体运动定律——重力的发现

杰出的物理学家、天文学家、发明家伽利略(图1-2-4),1564年出生于意大利的比萨。17岁入比萨大学学医。后来被欧几里得、阿基米德著作吸引,改学数学与物理。1589年任比萨大学数学教授,1592—1610年任帕多瓦大学教授。

1604年,伽利略做了著名的斜面实验(图1-2-5)。他使硬的、光滑的、极圆的铜球在铺上尽可能光滑的羊皮纸的斜槽中运动。观察到向下倾斜时小球越来越快,向上倾斜时小球越来越慢,不倾斜即小球在平板运动时,减速很慢,其原因在于板面对球的摩擦。伽利略将摩擦减小,则小球运动的

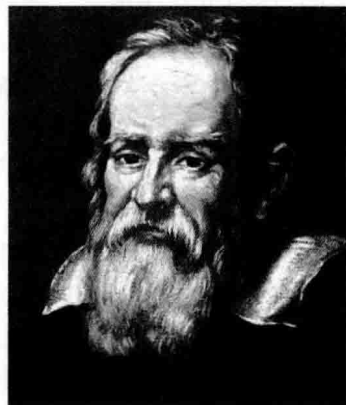


图1-2-4 伽利略

速度变化变慢，运动时间变长，运动距离变大。他进一步利用理想实验（图 1-2-5），将条件推向极限，引入了一个绝对光滑的水平面，这时引起小球变快变慢的倾斜因素没有了，摩擦也没有了，小球的速度只能不变，一直地运动下去……。这样，伽利略发现了惯性定律。物体的水平速度保持不变的原因在于物体具有惯性。物体作惯性运动不需外力维持，力与速度是不相联系的，力与加速度相联系。

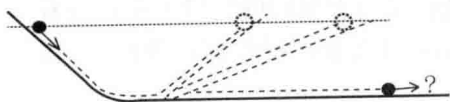


图 1-2-5 伽利略的理想斜面实验

伽利略通过斜面运动得到了匀加速直线运动的路程公式和速度公式  $S = at^2/2$  和  $v = at$ 。对竖直降落的物体，则有  $S = gt^2/2$  和  $v = gt$ ，这就是落体定律。其中系数  $g$  对任何自由落体都是相同的，称为重力加速度。伽利略发现了地球上物体所受的重力，

即发现了万有引力在地球和物体之间的存在。也可以说，重力是一种特殊形式的万有引力。伽利略发现的重力加速度恒定原理，导致牛顿形成惯性质量和引力质量的概念。他还提出了关于匀速直线运动的相对性原理，依据这一原理牛顿得到了惯性参考系的概念。这两条原理对万有引力定律的发现是不可缺少的。伽利略冲破了数学分析只能用于天体而不屑用于地上物体的传统观念，得到了落体运动定律的精确数学公式。1609 年，他用自己制作的望远镜观测天象，发现了月球上的环形山、木星的四个卫星、太阳上的黑子，发现银河是由大量星球组成的，发现了金星的盈亏现象，打破了天上物质永恒不变不灭和尽善尽美的神话，指明了所有物质都具有内聚力而导致了天体呈球形。从而，为天上物质运动与地上物质运动的统一提供了实验基础。由于伽利略没有摆脱天体运动是匀速圆周运动的传统观念，他没有速度的矢量性和向心加速度概念，所以误把行星绕日运动当作惯性运动，在发现重力之后没有想到太阳对行星的吸引力。

### 1.2.3 万有引力定律的发现

惠更斯和胡克等人，对万有引力定律的发现做出了贡献，牛顿最后完成了万有引力定律的发现。

#### 一、惠更斯发现了向心力定律

著名荷兰数学家、天文学家、物理学家惠更斯（图 1-2-6）1629 年生于海牙。他从小热爱数学，成绩卓著，法国大科学家笛卡儿在看到青年惠更斯的头两篇数学论文时，称赞他“前途无量”。惠更斯改进了望远镜物镜，发明了新的消色差目镜，用自制的望远镜发现了土星光环和第一颗卫星（土卫六），计算确定了土卫六运动周期。他最先判定地球两极附近是扁的，提出了用秒摆测定重力加速度的思想。1656 年惠更斯发明了摆钟。其后在研究碰撞实验中发现了速度的矢量性，进而认识到圆周运动中速度方向变化与加速度相联系。这种认识及对摆钟理论和一系列有关问题的研究，使他求得了摆的振动中心和振动周期，最先提出了向心力定律。



图 1-2-6 惠更斯

惠更斯在 1673 年发表的论文《摆动的时钟》一文中，

他将匀速圆周运动看作切线方向的匀速直线运动与指向圆心方向的匀加速运动的合成。如图 1-2-7 所示。

惠更斯对此作了简捷的证明。在极短的时间  $\tau$  内, 物体沿圆周运动通过弧长为  $\widehat{AB}$ , 将  $\widehat{AB}$  看作  $\overline{AG}$  与  $\overline{AC}$  的合成, 其中  $\overline{AG} = S$ , 为物体沿切线方向匀速直线运动的路程,  $\overline{AC} = \delta$ , 为指向圆心的匀加速直线运动的路程。所以  $S = v\tau$ ,  $\delta = a\tau^2/2$ ,  $a = 2\delta v^2/S^2$ 。又由  $\triangle AGB \sim \triangle DCB$  得:  $S/\delta = CD/S = (2R - \delta)/S$ , 所以  $S^2 = 2R\delta - \delta^2$ 。略去  $\delta^2$ , 所以  $a = v^2/R$ 。

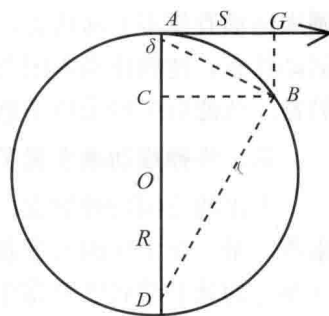


图 1-2-7 匀速圆周运动的合成

这就是惠更斯得到的向心加速度公式。公式表明: “两个等重的物体在大小不同的圆周上作等速运动, 则该二物体的向心力之比等于二圆周直径的反比。” “两个等重的物体在大小相同的圆周上以不同速度各作匀速运动, 则运动较快的物体的向心力与运动较慢的物体的向心力之比等于其速度的二次方之比。”

惠更斯的向心力定律, 为探索推动行星绕日运动的力指明了正确方向, 人们很自然地从事行星的向心力中猜测到太阳对行星的吸引力。这就为万有引力定律的发现奠定了最后一块基石。惠更斯已接近于发现万有引力定律。

## 二、胡克、哈雷和雷恩的发现

1661 年, 英国皇家学会成立一个专门委员会研究重力问题。物理学家胡克、天文学家哈雷、建筑师雷恩在引力问题研究方面都作出了重要贡献。胡克觉察到引力和地球上物体的重力本质相同。1662 和 1664 年, 他试图找出物体的重量随离地心距离的变化关系, 曾在高山上及矿井中做实验, 未获成功。1674 年, 胡克提出了关于引力的三条假设:

第一, 据我们在地球上的观察可知, 一切天体都具有倾向其中心的吸引力, 它不仅吸引其本身各部分, 并且还吸引其作用范围内的其他天体。因此, 不仅太阳和月亮对地球的形状和运动发生影响, 而且地球对太阳和月亮同样也发生影响, 连水星、金星、火星和木星对地球的运动都有影响。

第二, 凡是正在作简单直线运动的任何天体, 在没有受到其他作用力使其倾斜, 并使其沿着椭圆轨道、圆周或复杂的曲线运动之前, 它将继续保持直线运动不变。

第三, 受到吸引力的物体, 越靠近吸引中心, 其吸引力也越大。至于此力在什么程度上依赖于距离的问题, 在实验中还未解决。一旦知道了这一关系, 天文学家就很容易解决天体运动的规律了。”

这是在万有引力诞生前关于引力的最精辟的论述。

1679 年底至 1680 年初, 牛顿在回答胡克问询的复信中, 曾两次出现错误。胡克在纠正牛顿错误中明确指出, 重力是按距离的二次方成反比变化的。这时, 依据惠更斯的向心力定律从开普勒行星运动第三定律推出引力二次方反比关系的还有哈雷和雷恩。1684 年 1 月在伦敦的一次聚会中, 哈雷、雷恩和胡克谈论到二次方反比的力场中物体的运动轨迹问题。胡克声称, 可以用二次方反比关系证明一切天体的运动规律。雷恩怀疑胡克的说法, 提出如果有谁能在两个月内给出证明, 他愿出 40 先令作为奖励。胡克坚持说他确能证明, 只是不愿先公开, 想看看有谁来解决, 别人解决不了, 他再公布自己的证明。胡克、哈雷、雷恩关于引力与距离二次方反比关系的发现, 对牛顿很有启示。尤其是, 胡克将匀速

圆周运动看作不平衡状态，认为有某种力持续地作用于物体，破坏了物体原有的匀速直线运动状态，使物体沿着闭合的圆形轨道运动；以及 1679~1680 年间的通信对牛顿有很大教益。从此后牛顿采用了惠更斯的“向心力”一词。

### 三、牛顿成功地发现了万有引力定律

杰出的英国物理学家、数学家、发明家牛顿（图 1-2-8），1642 年生于英国林肯郡伍尔索普，是一个十足的农家孩子。小时候对机械发明很感兴趣。1661 年考入剑桥大学，博学多才的著名学者巴罗将牛顿引向自然科学的广阔天地。牛顿是一位“杰出的天才”“有惊人的创造才能”，“他那几乎神一般的思维力，最先说明了行星的运动和图像、彗星的轨道和大海的潮汐”。是现代自然科学的奠基人，经典物理学的创始人，微积分的发明人之一，牛顿还发明了反射式望远镜。

由于胡克在引力问题上的矜持，1684 年 4 月哈雷前往剑桥大学向牛顿请教：“假设一个行星受到太阳以和距离的二次方成反比递减的力的吸引，那它是以怎样的曲线运动呢？”牛顿马上回答“是椭圆”，并说自己作过计算。当哈雷表示希望看到计算内容时，牛顿称一时找不到。3 个月 后，牛顿将计算内容寄给了哈雷。这篇论文没有题目，后来人们通称为《论运动》。文中讨论了在中心引力作用下物体运动轨迹的理论，由理论导出了开普勒行星运动三个定律，这是其成功之处。但牛顿对惯性和引力的认识存在错误和不足，他将物体具有的惯性称为“固有力”，将引力只看作重力，尚未认识到引力的普遍性。

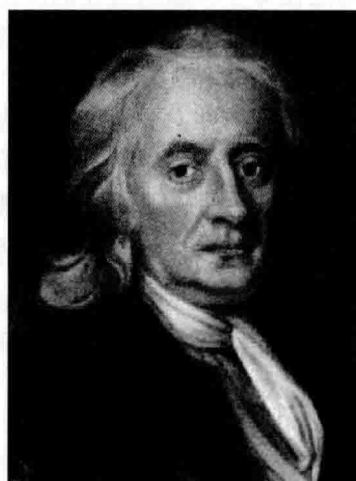


图 1-2-8 牛顿

经过 8 个多月的深入思考和严谨的数学推导，牛顿写成了《论物体的运动》的长篇文章，交给了剑桥大学图书馆。这篇长文中，牛顿解决了对惯性的认识问题，承认圆周运动是匀加速运动，与匀加速直线运动有联系；牛顿证明了均匀球体对球外物体的吸引力与球的质量成正比，与从球心算起的球到物体间的距离二次方成反比，提出可以将均匀球体看成质量集中于球心的质点；吸引是相互的；把重力和引力统一起来，明确了引力的普遍性。

《论物体的运动》的第二部分，收集在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》一书中，标题是“论世界体系”。文中阐述了牛顿在伽利略研究抛射体运动规律的基础上想象出的理想实验：“行星依靠向心力可以保持在一定的轨道上。这只要考虑一下抛射体的运动，就可以很容易理解了：一块被抛出的石头，由于自身重量的压迫不得不开直线路径，它本应按照开始的抛射方向走直线，而现在它在空中划出的却是一条曲线，最后落到了地面；抛射时的速度越大，它在落地时就走得越远。因此，我们可以假定抛射的速度不断增大，使它到达地面之前能划出 1, 2, 5, 10, 100, 1000 英里长的弧线，最后一直增加到超出了地球的界限，这时石头就要进入空间而碰不到地球了。”如图 1-2-9 所示。图中，物体自 V 点抛射，当抛射速度依次增大时，物体划出的弧线越来越长，即  $\widehat{VD} < \widehat{VE} < \widehat{VF} < \widehat{VG}$ ，直至形成圆周 VBAV。若 V 点高度依次增加，则可得一些与地球同心或偏心的圆圈。



牛顿从其中领悟到，石头下落与天体运动有一个共同的原因——引力，从而将地球上物体运动与天体运动统一起来。牛顿认为：惯性是原子普遍具有的固有属性，用它可以量度质量的多少，称为惯性质量；引力也是原子的普遍属性，是物质间存在相互作用的一种性质，引力质量与惯性质量是统一的。牛顿以空前的洞察力、突破性的思辨和辛勤的劳动换取了丰硕的科学成果，发现了万有引力定律： $F=G m_1 m_2 / r^2$ 。其中  $m_1$ 、 $m_2$  分别为两个物体的质量， $r$  为它们间的距离， $G$  为万有引力常数。为了更加稳妥，他以月球为例，用运动学与动力学两种方法计算了月球的向心加速度，差值很小，并且可以归结为月球绕地球运转轨道并非理想圆形等因素。完全可以说，这种对万有引力定律的检验方法取得了令人满意的结果：万有引力定律是正确的。

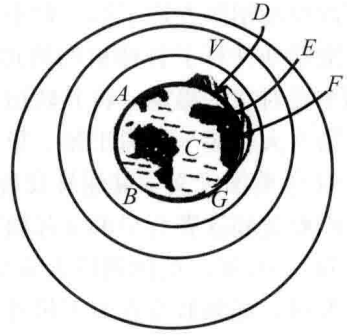


图 1-2-9 牛顿抛射体理想实验

万有引力常数  $G$  是一个非常重要的物理常数，它是经典力学时代的标志。1798 年，英国物理学家卡文迪什用扭摆实验（图 1-2-10）测得了  $G$  值， $G=6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，最后完善了万有引力定律。

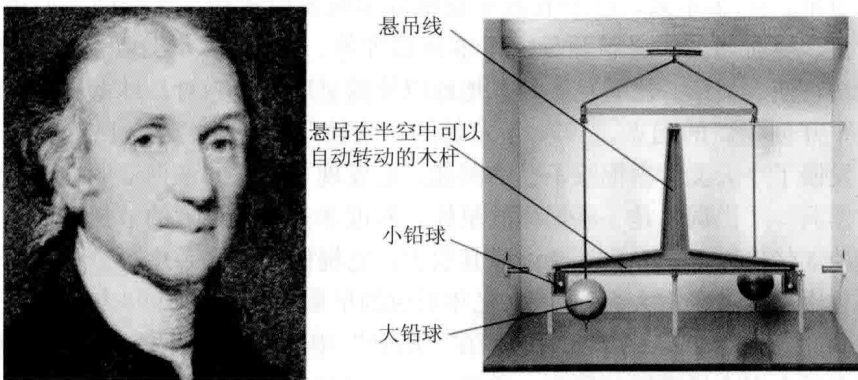


图 1-2-10 卡文迪什用扭摆实验

#### 四、万有引力定律获得了震撼世界的成功

牛顿用经验归纳法和科学的推理方法将前人获得的优秀科学成果加以分析、综合、升华，发现了万有引力定律，创立了经典力学。也可以说，他是“站在巨人的肩上”发挥聪明才智，并以惊人的创造力和想象力获得这一具有划时代意义的巨大科学成就的。

万有引力定律发现前后，人们对彗星的出现很不理解。天文学家哈雷注意到 1531 年、1607 年、1682 年出现的三颗彗星轨道基本重合，推想这三颗可能是同一颗彗星出现三次的结果，周期为 76 年。他依万有引力定律计算出这颗彗星的扁长椭圆轨道，并预言它将在 1758 年再次出现。人们果然在 1759 年初观测到了这颗彗星，事件轰动了整个欧洲，万有引力定律获得了很大成功。人们将这颗星定名为“哈雷彗星”。1798 年，英国科学家卡文迪什测得了万有引力常数  $G$ ，并计算了地球的质量  $M=6 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，取得了“称量地球”的轰动效果，这说明了万有引力定律是正确的，有难以估量的功能。1801 年，皮阿齐在