

高等学校物理学小丛书

万有引力和 引力场

高等教育出版社

21
RQ

高等学校物理学小丛书

万有引力和引力场

祝瑞琪 马见慈 编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是高等学校《物理学小丛书》中的一册，是为高等学校普通物理课教学需要而编写的参考读物。

本书主要介绍万有引力定律的发现过程、内容及其重大作用。此外还简要地介绍了引力场和引力理论。

本书主要供高等工科院校一、二年级学生作为普通物理课程的课外读物，也可供有关读者参考。

高等学校物理学小丛书

万有引力和引力场

祝瑞琪 马见慈 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本787×1092 1/32 印张5.5 字数108,000

1985年8月第1版 1985年8月第1次印刷

印数 00,001—6,460

书号 13010·01030 定价1.05元



伊萨克·牛顿
(Isaac Newton, 1642—1727)

MA 586 / 05

前 言

1687年，伟大的英国物理学家牛顿(I. Newton, 1642—1727)在他的巨著《自然哲学的数学原理》一书中，最早介绍了万有引力定律的内容。这一定律的发现，使得人们对行星运动规律的认识更加清楚和深刻。人们用万有引力定律不但能解释行星的运动，而且还能发现新的行星。1845年和1846年，两个互不相识的青年，英国的亚当斯(J. C. Adams, 1819—1892)和德国的勒维耶(U. J. Leverrier, 1811—1877)在差不多相同的时间内，利用引力理论通过长时间复杂的计算，预言了另一新行星的存在。就在勒维耶将信寄到柏林天文台的那天晚上，德国天文学家伽列(J. G. Galle, 1812—1910)按照信中所学方位果真发现了一颗新的行星——海王星。这一戏剧性的事件，至今仍为人们所传颂。

万有引力定律的正式发表迄今已近300年。在此期间，牛顿的万有引力定律在每一次重大的关键时刻都经受住了严峻的考验。历史证明这样一个事实，这一定律仍像牛顿当初发现它时那样，是完全正确的。

1957年，也就是万有引力定律发表后的第270年，第一颗人造卫星问世了，这一事件轰动了整个世界。人们较多地称颂发射卫星的新技术、新成就，却很少想到牛顿及其所发现的万有引力定律对这一成就的巨大贡献。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中论述行星在万有引力作用下绕太阳作轨道运动时，曾指出：在高山之巅水平抛出一物体，若空气阻力

忽略不计，只要平抛物体的速度足够大，物体将在地球引力作用下，围绕地球作圆轨道或偏心圆轨道运动。正象行星在自己的轨道上不停地转动一样。我们可以说，牛顿是第一个提出人造地球卫星观念的人。

近 20 多年来，人类在征服宇宙空间方面取得了巨大的成就：载人卫星式飞船的发射、登月飞行的成功、奔向土星、木星的飞船的发射、航天飞机的发射，等等。尤其是 1977 年美国发射的旅行者一号和二号飞船，巧妙地利用了木星、土星等行星对飞船的引力作为飞船加速的“动力”，从而节省了大量燃料。可以预料，在人类向其它星球的进军中，万有引力定律仍将占有重要的地位。

本世纪初，伟大的理论物理学家爱因斯坦 (A. Einstein, 1879—1955) 对引力场进行了理论研究，并提出了“引力波”的概念。“引力波”是否存在？近几年来有关这方面的研究报导不少，但至今还没有在实验室中完成产生引力波和直接测量引力波讯号的实验。总之，对引力的认识和研究虽已取得很大成就，但还有大量艰巨的工作等待人们去探索。

本书共分五章：

第一章 开普勒 (J. Kepler, 1571—1630) 定律和万有引力定律

第二章 有心力作用下质点的运动

第三章 卫星和行星的运动

第四章 引力场

第五章 引力理论初步

本书在编写过程中，曾得到我院恽瑛副教授和马文蔚副教授的支持和帮助。初稿完成以后，又承大连海运学院成家

复教授仔细审阅,并提出许多宝贵的意见。在此,我们仅向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平,错误和不妥之处在所难免,敬希广大读者批评指正。

祝瑞琪 马见慈

于南京工学院

1984年4月

目 录

第一章 开普勒定律和万有引力定律	1
§ 1.1 地心说和日心说	1
§ 1.2 开普勒定律	9
§ 1.3 万有引力定律的产生	13
§ 1.4 引力常数的测定	19
§ 1.5 地球的形状	24
§ 1.6 潮汐	27
§ 1.7 海王星的发现	33
第二章 有心力作用下质点的运动	37
§ 2.1 有心力的基本性质	37
§ 2.2 质点的运动微分方程和轨道微分方程	39
§ 2.3 轨道参数与总能量及角动量的关系	45
§ 2.4 有效势能和轨道特征	47
第三章 卫星和行星的运动	53
§ 3.1 人造地球卫星的运动 第一宇宙速度	53
§ 3.2 人造地球卫星的发射、回收和应用	58
§ 3.3 人造星体的运动 第二、第三宇宙速度	65
§ 3.4 九大行星	71
§ 3.5 小行星	79
§ 3.6 彗星	81
第四章 引力场	85
§ 4.1 引力场的概念	85
§ 4.2 引力场强	87
§ 4.3 引力势	91

§ 4.4	力线和等势面	93
§ 4.5	力线的通量 引力场中的“高斯定理”	95
§ 4.6	引力屏蔽	105
第五章	引力理论初步	108
§ 5.1	引力质量与惯性质量	109
§ 5.2	贝塞尔和厄阜实验	111
§ 5.3	等效原理	116
§ 5.4	马赫原理 广义相对性原理	121
§ 5.5	光线在引力场中的偏转	124
§ 5.6	谱线的引力红移	132
§ 5.7	孪生子佯谬	142
§ 5.8	水星近日点的进动	156
§ 5.9	引力波	157
附录	度规张量	161

第一章 开普勒定律和 万有引力定律

§ 1.1 地心说和日心说

日月星辰每天东升西落，已成为人们熟悉的天文现象。然而对这些天文现象的认识，曾经历过漫长曲折的道路。

最早埃及人认为，宇宙是在天空女神娜黛的环拥之下，而女神的身上则遍布着星星，东升西落的太阳为她每天吞吐的食物，夜晚将太阳吞进肚里，早晨又把太阳吐出。

历史记载着古希腊人特别喜爱圆，认为圆是最美好的曲线。物体只有沿圆周路径才能重复周期性的运动，所以，理所当然天体也应按既珍贵且完美的圆而运动。于是，公元前四世纪，古希腊人便产生了各种天体围绕地球运转的思想。太阳、月亮和星星之所以不坠落，是因为有看不见的同心球或同心圆带着它们绕地球旋转的缘故。

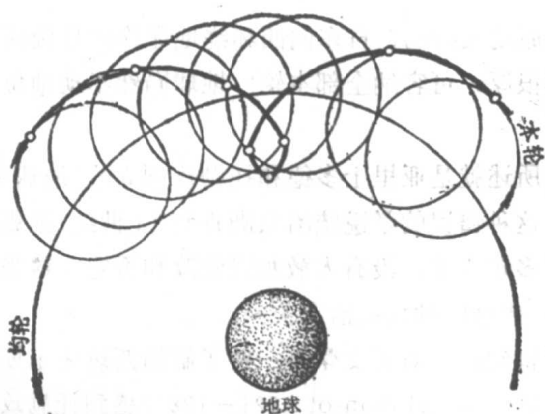
古希腊著名的哲学家亚里士多德 (Aristotle, 公元前 384-322) 以此为基础建立了关于宇宙结构的“地心说”。他认为宇宙分为天、地两层，地球之外为天层，地球之内为地层。天层的最外层是“原动天”，统率整个宇宙，推动恒星天层自西向东作周日运转。至于“原动天”为何能推动恒星天层，那只能是上帝的力量。恒星天层又相继带动土星、木星、水星、金星、太阳和月球运动。最外面的土星，因抵抗原动天的推动所受阻力最大，因而运行周期最长，而靠近地球的月球所受阻力

最小，因而运行周期最短。人们赖以生活寄居的地球是不运动的，它是宇宙的中心。

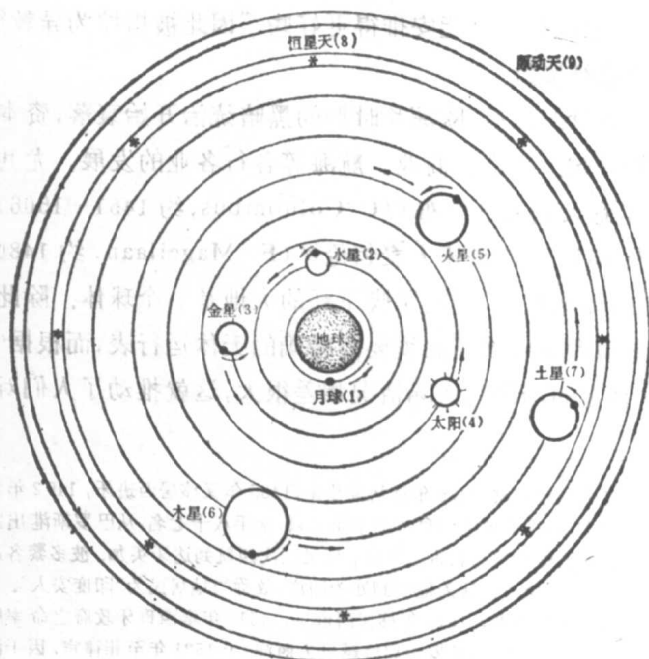
按此设想，行星与地球应保持固定的距离，然而事实并非如此，人们发现行星在运动中它的亮度会发生明显的变化，这就表明行星有时离地球近些，有时离地球远些。为此，古希腊几何学家阿波罗尼(Apollonius，生不详，卒于公元前200)提出了“本轮”理论。他认为，每个行星都沿着一个称为“本轮”的小的圆作匀速圆周运动，而本轮的中心又沿着一个大圆(称为“均轮”)绕地球作匀速圆周运动(图1-1a)。行星沿本轮运行的周期为一年，本轮中心沿均轮运行一周所需的时间等于各行星的恒星周期，如火星的周期约2年，木星12年，土星30年，等等。由“本轮”理论，可以较好地解释行星和地球之间距离的变化引起行星亮度变化的原因。

公元前二世纪，天文学家喜帕恰斯(Hipparchus)发表了阿波罗尼的“本轮”理论。为了解释太阳周年运行的不均匀性(夏半年慢，冬半年快，与匀速圆周运动相抵触)，他提出了“偏心”理论，即太阳虽作匀速圆周运动，但地球位于偏心的另一位置上，由此可以解释太阳的不等速运行。

公元前二世纪，生于埃及，但长期居住在亚历山大城的托勒玫(C. Ptolemaeus, 约90-168)根据前人的设想，首先创立了以“地球中心论”为基础的天文学理论体系。他设想宇宙有“九重天”，即围绕地球运转的有九个同心的球壳。他们的顺序是：月球天，水星天，金星天，太阳天，火星天，木星天，恒星天和原动天(图1-1b)。月球天靠地球最近，太阳位于第四重天上，是主宰宇宙的灵魂，恒星如同宝石一样镶嵌在第八重天(恒星天)的天界上，最外层的原动天是神灵居住的天堂。全



(a) “本轮”理论用图



(b) 托勒玫宇宙结构图

图 1-1 “地球中心说”示意图

部球层受原动天推动，自东向西环绕地球作周日旋转。每一层球壳都很厚，可容纳全部本轮。地球岿然不动地位于宇宙的中心。

以上所述就是亚里士多德和托勒玫创立的“地球中心说”的内容。这种错误的学说统治欧洲直到14世纪，独霸天文界竟达一千多年之多，没有人敢加以修改和否定。这当然与欧洲漫长的、残酷的神权统治有关。

十三世纪时，对天文学有一些了解的西班牙卡斯提腊国王阿尔方梭十世(Alphonso, 1221—1284)感到托勒玫的体系很复杂，发了一句牢骚：“上帝创造世界时要是能征求我的意见，那天上的秩序可能安排得更好些。”因此被指控为异教徒，连王位也被废黜。

十五世纪以后，欧洲长时期的黑暗统治开始衰落，资本主义开始兴起。生产、商业、航海等各行各业的发展，尤其是1492年意大利人哥伦布^①(C. Coluombus, 约1451—1506)的航行及1519年西班牙人麦哲伦^②(F. Magellaan, 约1480—1521)的环球航行，证实了脚下踩的大地是一个球体。除此之外航海事业的发展还必须要有精确的天体运行表，而根据“地心说”制定的历法与实际情况相差很大，这就推动了人们对天

① 意大利航海家，1476年移居葡萄牙，1485年又移居西班牙，1492年奉西班牙统治者之命，携带致中国皇帝书率船三只，水手八十七名，从巴罗斯港出发横渡大西洋到达巴哈马群岛和古巴等岛，后又三次西航到达牙买加、波多黎各及中美、南美等地。哥伦布误认为他所到处为印度，故称当地居民为“印度安人”。

② 葡萄牙航海者，1517年移居西班牙，1519年奉西班牙政府之命率船五只，水手二百六十五人，由圣罗卡启航越过大西洋，于1521年至菲律宾。因干涉岛上的内争，为当地居民所杀。1522年船队中的“维多利亚号”回到西班牙，完成第一次环球航行。

体结构进行进一步的研究。

才华出众的波兰天文学家哥白尼(N. Copernicus, 1473—1543) 以丰富的天文资料及准确的数学运算写成“天体运行论”一书(此书于1543年,也就是他逝世的那一年才出版)。他在书中提出了“地动说”,向神圣不可侵犯的“地心说”挑战,他认为地球不是宇宙的中心。哥白尼写道:“地球的确围绕太阳旋转,星星并不围绕地球转,”“地球像其他五个著名行星——水星、金星、火星、木星和土星一样都是行星,这些行星围绕太阳旋转……。”



图 1-3 是哥白尼提出的太阳中心说的宇宙结构图。图 1-2 哥白尼(N. Copernicus, 1473-1543)

哥白尼的“日心地说”一提出,立即遭到了宗教及支持“地心说”的亚里士多德派的强烈反对。

新教首领马丁·路德^① (M. Luther, 1483-1546) 指责哥白尼说:“这位新奇的天文学家,企图证明旋转着的是地球而不是天体、太阳和月亮。……只有傻瓜才想把整个天文学连底都翻过来。圣经上明明写着,耶稣喝令停止不动的是地球而不是太阳。”

宗教势力特别害怕“日心说”的传播,下令将哥白尼的著作“天体运行论”列为禁书(直到1757年才解禁),他们还残酷

^① 马丁·路德是十六世纪德国宗教改革运动的发起者,基督教(新教)路德宗的创始人。

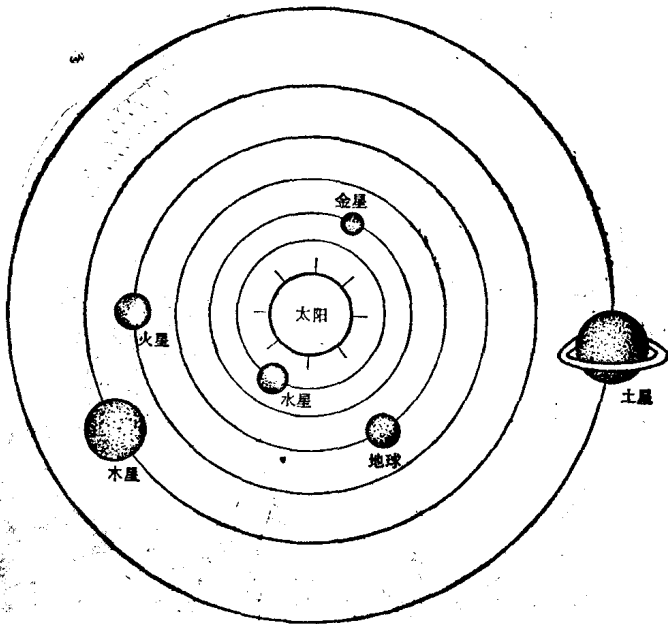


图 1-3 哥白尼提出的宇宙结构图——太阳中心说

地迫害哥白尼学说的追随者和支持者。

意大利哲学家乔丹诺·布鲁诺(G. Bruno, 1548—1600)由于接受和支持哥白尼的学说，竟被罗马宗教裁判所判处死刑，于1600年2月17日活活地烧死在罗马鲜花广场的柴堆上。在押赴刑场前，惟恐布鲁诺在刑场发表演说而割去了他的舌头。大火熄灭后，又把布鲁诺的骨灰投入台伯河，为的是不留任何“异端”痕迹。

意大利人伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)不信宗教和亚里士多德派的谬论，经常以嘲笑的口吻说：“眼睛啦！鼻子啦！”，“有人只看见鼻子底下的那点东西。哥白尼是正确

的,我要加以证实。”伽利略用自制的望远镜研究了月球及其它行星的运动。1610年1月7日是他生命中最伟大的一天,他从望远镜中看到木星附近有三个较小的星球,就象三个小“月亮”一样。过了几天,又发现了第四个。长期观察的结果表明,这些小的星球每天晚上都在改变位置,伽利略说:“现在我可以肯定哥白尼是正确的,那些亚里士多德派学者说月亮绕地球旋转,因此太阳也一定绕地球旋转,但这些‘月亮’却绕木星旋转,而太阳却不绕木星旋转。因此,他们的理由是站不住脚的,现在我终于证明他们错了。”伽利略在他的《星球的使者》一书中进一步阐述了哥白尼的学说,并为他提供了更多的证据。



图 1-4 伽利略(Galileo Galilei,
1564—1642)

1611年伽利略到了罗马,他让人们通过望远镜观看行星和月亮的运动。一部份人接受了他的观点,一部份人反对,还有一部份人害怕望远镜,连看也不敢看。这些人说:“亚里士多德没看过这些东西,因此,我们也不想看。”

伽利略以充分的证据支持和宣传了哥白尼的学说。这引起了宗教界及亚里士多德派学者的愤怒。1616年3月26日伽利略受到了宗教裁判所的第一次审讯,红衣主教那明尼警告他必须放弃“异端学说”,否则要受到严厉制裁。伽利略不

得不在《否认书》上签字，表示服从。然而伽利略却口服心不服，仍然继续他的研究工作。

七年后老教皇死了，新教皇乌尔班八世接位。伽利略说：“乌尔班是我的老友，他总能乐意倾听新鲜见解的，我应该为他写书。”于是1632年他写成了《关于两种世界体系的对话》一书。这本书通俗易懂，深受广大群众的欢迎。书中写道：“这两位科学家（指托勒玫和哥白尼）都是有学识的人，但他们对某些重要问题的解答各不相同，这里记录了他们的解答，哪些对？哪些错？我无法给你们回答，让事实说话吧！”。谁知这样一本公正而诚实的著作却给伽利略带来了弥天大祸。被认为是企图抗拒1616年的警告。这下惹恼了新教皇乌尔班，1632年底他下令再次传审伽利略，当时69岁高龄的伽利略正在生病，卧床不起。年迈病重的伽利略被迫在别人为他写好的认罪书上签了字。法庭还将《对话》一书列为禁书，将伽利略终身监禁在他的住所中。

传说伽利略在审判后走出教庭时，嘴里还喃喃地自言自语说：“地球还是在动呀！”伽利略由于精神上和肉体上受到摧残，于1642年含冤去世，这便是三百多年前有名的“伽利略案件”。

1979年11月10日罗马教皇在公开集会上正式承认伽利略在十七世纪三十年代受到的审判是不公正的。1980年一个由世界著名科学家组成的委员会（其中包括杨振宁博士和丁肇中博士）重新审理了伽利略案件，为伟大的科学家伽利略三百余年的冤案平反昭雪。

尽管宗教势力及亚里士多德派学者竭尽全力反对哥白尼的日心说，但在越来越多的证据支持下，哥白尼的日心说终于