

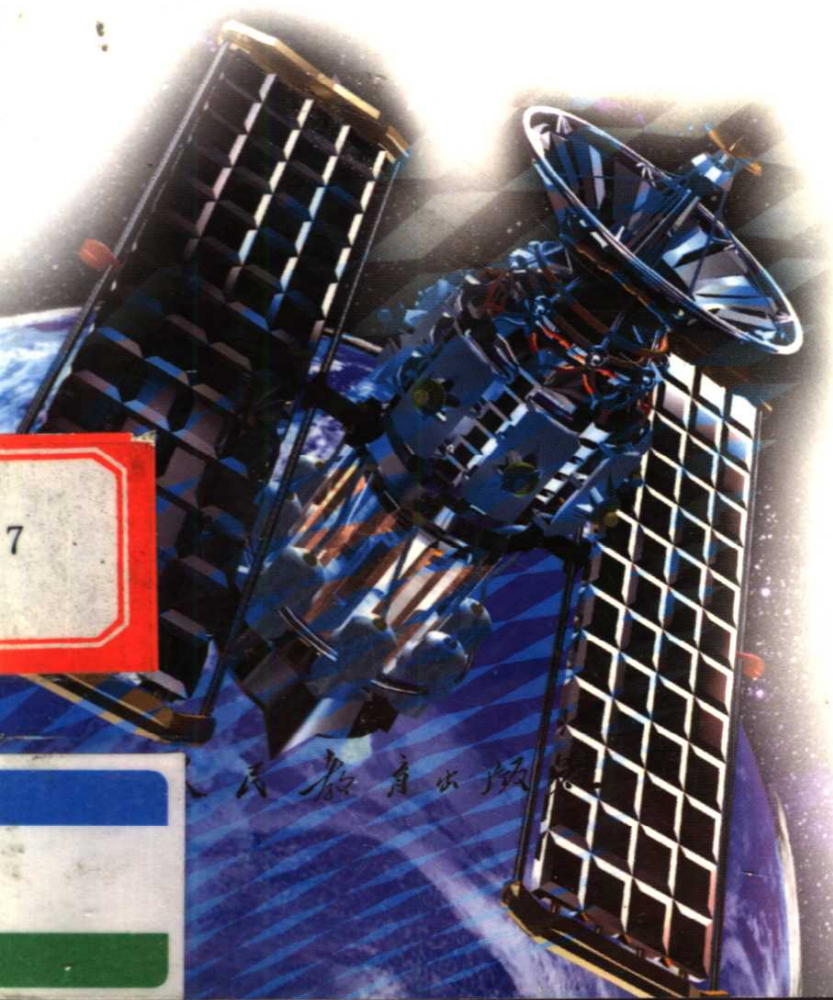
全国中小学教师继续教育

专业必修课教材

高中物理专题分析丛书

# 万有引力

WANYOU YINLI 教育部师范教育司组织编写  
祁有龙 编著



7

人民教育出版社

高中物理专题分析丛书

---

# 万有引力

祁有龙

人民教育出版社

·北京·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

万有引力/祁有龙编. —北京: 人民教育出版社, 2003  
(高中物理专题分析丛书)

ISBN 7-107-17100-3

I. 万...

II. 祁...

III. 物理课—高中—教学参考资料

IV. G633.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 085293 号

人民教育出版社出版发行

(北京沙滩后街 55 号 邮编: 100009)

网址: <http://www.pep.com.cn>

北京四季青印刷厂印装 全国新华书店经销

2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

开本: 890 毫米×1 240 毫米 1/32 印张: 6

字数: 145 千字 印数: 0 001~3 000 册

定价: 9.20 元

## 高中物理专题分析丛书编委会

主 编 陈熙谋

副 主 编 周誉蔼

编 委 (汉语拼音为序)

陈熙谋 北京大学

洪安生 北京市海淀区教师进修学校

缪钟英 四川联合大学

彭前程 人民教育出版社

施桂芬 上海教育出版社

王天谔 北京市东城区教育教学研究中心

张大昌 人民教育出版社

周誉蔼 北京十五中

本册作者 祁有龙 首都师范大学

本册审稿 陈秉乾 北京大学

张三慧 清华大学

翁豪英 中国人民大学附属中学

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系调换。

(联系地址：北京市方庄小区芳城园三区 13 号楼 邮编：100078)

## 前 言

全面推进素质教育，是当前我国现代化建设的一项紧迫任务，是我国教育事业的一场深刻变革，是教育思想和人材培养模式的重大进步。实施面向 21 世纪中小学教师继续教育工程，提高教师的素质，是全面推进素质教育的根本措施。

实施中小学教师继续教育，课程教材建设是关键。当务之急是设计一系列适合中小学各学科教师继续教育急需的示范性课程，编写一批基础性教材。

我司根据教育部《中小学教师继续教育课程教材建设方案》的统一规划，参考《中小学教师继续教育课程开发指南》，以中学物理教师继续教育课程教材建设引路，在调查研究和总结经验的基础上，首先设计急需的示范性课程，编制课程标准，经专家审定后，作为编写教材的依据。我们在设计示范性课程及课程标准时，遵循了以下原则：1. 从教师可持续发展和终生学习的战略高度，在课程体系中，加强反映现代科学技术的发展和应用的课程，加强中学物理专题研究的课程。2. 把教育理论和教师教育实践经验的总结与教育实践活动的改进紧密结合。用现代教育观念和理论方法，优秀课堂教学范例，从理论和实践的结合上，总结教学经验，提高教师教学能力，推动教育改革，落实素质教育。3. 适应教师培训模式改革的需要，有利于培养教师的创造精神和主观能动性。4. 注意有效，即实效性。有限，即适量性。有别，即层次性。有序，即科学合理的系统性。兼顾整体性与个体性，科学性、先进性与针对性相统一，灵活性与统一性相结合。

根据专家审定的中学物理教师继续教育示范性课程和课程标

准，编写9种基础性教材：《初中物理专题分析》、《高中物理专题分析》、《初中物理教学设计》、《高中物理教学设计》、《中学物理与现代科技》、《物理学发展中的创新思维选例》、《中学物理实验教学与自制教具》、《中学教师物理教育研究方法》、《中学活动课指导》。这些教材从今年秋季开始陆续出版。中小学教师继续教育语文、数学，中学教师继续教育英语、化学、生物，小学教师继续教育自然、社会等7个学科2~3种急需的示范性课程以及课程标准的设计已经启动，相应的教材将于明年底出版。同时我们还从全国推荐的中小学教师继续教育教材中，组织专家评审筛选一批优秀教材和教学参考书。上述这些教材和新编的基础性教材将向全国教师进修院校、教师培训基地、中小学教师推荐，供开设中小学教师继续教育相关课程时选用。根据继续教育的需要，我们还将继续设计开发新的课程和教材。

中小学教师继续教育教材建设是一项系统工程，尚处在起步阶段，缺乏足够的经验，肯定存在许多问题。各地在使用教材过程中有什么问题和建议，请及时告诉我们，以便改进工作，把课程教材建设提高到一个新水平。

教育部师范教育司  
一九九九年六月二十四日

## 主编的话

唐代著名的文学家、教育家韩愈在他著名的教育论著《师说》中指出，教师的基本任务有三：传道、授业、解惑。按照今天的理解，传道包含了传授做人的道理和治学研究的方法，授业就是讲解有关的专业知识，解惑就是解答学习中遇到的问题，这三者构成了当今实施素质教育的基本要素。

一个有责任感的教师在备课中总是不断地思考和研究传道、授业和解惑三者的统一，不断思考和研究如何才能使学生更好地理解和掌握教学内容，领悟治学研究的方法，从而迸发出创新的火花。这种思考和研究永无止境，而且也正是在这种思考和研究中，教师得到磨炼而更加干练和成熟。

呈现在读者面前的这套《初中物理专题分析》和《高中物理专题分析》丛书，是教育部师范司下达任务，人民教育出版社组织有经验教师撰写的中学物理教师继续教育教材的一种。作者们搜集了中学物理教学中可能出现的问题，有些是教师教学进一步深入可能会遇到的问题，有些则可能是学生进一步思考提出的问题，把它们组织起来，以更高层次的观点、近代物理的观点审视和给以分析。这不仅可以成为广大中学教师备课的好帮手，而且作为一种范例，它也是引导广大教师深入开展教学研究，并通过教学研究提高自身素养的好途径。

需要指出，《专题分析》只是就教学中可能遇到的问题作了分析，对于教师如何正确理解提供了说明，这并不是说要求教师原封不动地把这些专题分析搬到课堂教学中去给学生讲授。须知课堂讲授应根据教学大纲（或课程标准）的要求进行，随意改变教学大纲

(或课程标准)的要求,增加教学的深度和难度,从而增加学生的负担都是不适宜的和不可取的.诚然,《专题分析》中有些专题及其分析适于渗透在课堂教学中给学生讲解,有些适于对学生作个别解答,有些则适于组织学生课外学习探寻正确答案.这里存在一个掌握分寸的问题.

我们希望这套《专题分析》丛书能够切实解决广大中学教师教学中遇到的问题,并受到欢迎.



# 目 录

一、概述 .....	( 1 )
1. 引力的特性 .....	( 1 )
2. 引力问题在物理学中所占的地位 .....	( 4 )
3. 自然界的和谐统一与引力理论的发展 .....	( 6 )
4. 万有引力定律在高中物理教学中的地位 .....	( 9 )
5. 万有引力定律的教学与科学素质教育 .....	( 11 )
二、万有引力定律的建立 .....	( 13 )
1. 引力思想的发展 .....	( 13 )
2. 引力的平方反比律的推证 .....	( 16 )
3. 引力的普适性和万有引力定律的建立 .....	( 31 )
4. 对万有引力定律建立的过程中的科学思想和科学方法 的评述 .....	( 33 )
三、引力常量的测定与万有引力定律的验证 .....	( 36 )
1. 引力常量的普适性 .....	( 36 )
2. 引力常量的实验测定 .....	( 38 )
3. 新行星的发现 .....	( 43 )
四、惯性质量与引力质量 .....	( 51 )
1. 质量概念的发展 .....	( 51 )
2. 惯性质量与引力质量是两个不同的概念 .....	( 53 )
3. 惯性质量与引力质量的关系 .....	( 59 )
4. 惯性质量与引力质量相等的实验验证 .....	( 61 )
五、如何计算两个物体间的万有引力 .....	( 70 )
1. 问题的提出 .....	( 70 )

2. 质量均匀分布的薄球壳对壳内、外质点的引力 .....	( 71 )
3. 质量分布具有球对称特点的球体对球外质点的 引力 .....	( 74 )
4. 任意两个物体间的引力 .....	( 76 )
六、万有引力定律的某些推论.....	( 87 )
1. 地球的形状 .....	( 87 )
2. 重力加速度的变化 .....	( 89 )
3. 潮汐作用 .....	( 94 )
4. 彗星的运动 .....	( 99 )
5. 双星系统与银河系的自转及质量分布 .....	( 101 )
6. 黑洞 .....	( 112 )
七、人造地球卫星与航天技术.....	( 118 )
1. 第三宇宙速度 .....	( 118 )
2. 人造地球卫星的发射与返回 .....	( 120 )
3. 人造地球卫星的应用 .....	( 127 )
4. 载人飞船、航天飞机与空间站 .....	( 142 )
5. 登月飞行和星际探测器 .....	( 149 )
八、引力理论的发展.....	( 157 )
1. 牛顿引力理论遇到的困难 .....	( 157 )
2. 广义相对论的基本原理 .....	( 161 )
3. 广义相对论的检验 .....	( 166 )
结束语.....	( 175 )
主要参考资料.....	( 178 )

## 1. 引力的特性

物理学主要研究物质运动的普遍规律和物质的基本构成，核心的问题是物质间的相互作用。宇宙万物种类繁多、形状各异，它们的相互作用极其复杂。但现代科学已经证明，自然界中一切物质间的相互作用都可以归结为四种基本的作用，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。作为四种最基本的自然力之一的引力，与另外三种力相比较，又有其独特之处。

### (1) 引力是普遍存在的

任何两个质量不等于零的物体之间，不需作任何处理，都无一例外地存在着这种引力相互作用。由于引力作用无处不在，无时不在，无所不在，因此称之为“万有”引力。而电磁相互作用只存在于带电的粒子或带电的宏观物体之间，在使两个物体产生电力作用以前，至少要使其中的一个物体带电；在使两个物体产生磁力作用之前，我们至少要使其中的一个物体磁化。强相互作用和弱相互作用则只存在于微观粒子，如质子、中子、介子等粒子之间。唯有万有引力是普遍存在的。

### (2) 引力作用的范围大

引力和电磁力都是长程力，而强相互作用和弱相互作用都是短程力，作用范围都很小。强相互作用所及的范围小于  $10^{-15}$  m，当两个相邻的强子<sup>①</sup>间的距离超过  $10^{-15}$  m 时，强相互作用就小到可

<sup>①</sup> 强子是能直接参与强相互作用的粒子的统称。现已发现的 788 种粒子中，绝大多数是强子，占 772 种。除强子外，还有 12 种轻子和 4 种规范粒子。最常见的强子是质子和中子。到现在为止，实验上已发现并已确认的强子有 363 种。已发现但未确认的还有 409 种。

以忽略不计的程度。弱相互作用的范围更小，大约小于  $10^{-17}$  m，而且作用力比强相互作用要小得多。因此在大尺度的情况下，特别是在宇宙天体之间，由于天体的质量非常大，所以万有引力起着主要作用。在我们周围，地球上的任何物体，包括我们自身，都受到地球的引力作用。人类最早注意到的力就是地球的引力。可见引力与我们的日常生活息息相关。

### (3) 引力无法屏蔽

不论我们在一个物体与地球之间设置什么样的屏障，都不能将地球对物体的引力屏蔽起来，而且在地球上某一固定位置，一个物体所受到的地球的引力是不变的，不会由于物体与地球之间的屏障而有所减弱，这已为长期以来的实验所证实。而电力和磁力都可以屏蔽，并且可以通过增减物体的带电量，或改变电荷的运动状态等方法来改变电磁相互作用的强弱。

### (4) 引力的相对强度小

在四种基本相互作用中，万有引力最弱。在天体运动和宏观现象中，引力起重要作用，但在原子核和粒子间的作用中，引力是十分微小的，甚至可以忽略不计。其它三种相互作用中，以强相互作用最强，比电磁相互作用大 100 多倍。四种基本相互作用的相对强度、作用范围等特征的比较见表 1-1。

表 1-1 四种基本相互作用的比较

作用名称	产生作用的物体	相对强度	媒介	作用范围
强相互作用	强子（核子、介子等）	1	胶子	$<10^{-15}$ m
电磁相互作用	电荷	$10^{-2}$	$\gamma$ 光子	无限远
弱相互作用	大多数微观粒子	$10^{-12}$	$W^{\pm}$ 、 $Z^0$	$<10^{-17}$ m
引力相互作用	一切有质量的物体	$10^{-37}$	引力子	无限远

### (5) 引力的线性迭加性

如果空间分布着质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\dots$ 、 $m_n$  的若干个质点，

当其中每一个质点单独存在时，作用在另一个固定在某一位置的质量为  $m$  的质点的引力分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $\dots$ 、 $F_n$ ，则当所有这  $n$  个质点同时对  $m$  施加引力作用时，质点  $m$  所受到的总的万有引力为

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i \quad (1.1)$$

式(1.1)表明，两个质点间的引力作用只与这两个质点有关，而与其它质点是否存在毫无关系，这就是我们通常所说的引力的独立作用原理，这一物理规律表明引力具有线性迭加性。有人以为这种线性迭加是所有力的普遍规律，这是没有根据的。并不是所有的力都具有这种性质，例如，强相互作用就没有这种性质。

#### (6) 这种相互作用只有引力而没有斥力

我们知道，两个静止的点电荷之间存在着相互吸引或者相互排斥这两种作用，运动的电荷相互间除了电力作用外，还有磁力相互作用。磁力实际上是电力的一种表现，或者说，磁力和电力具有同一本源。磁力也有相互吸引和相互排斥两种作用。强相互作用也有吸引和排斥两种作用。自然界的四种最基本的相互作用都随距离的增大而减弱，但它们随距离变化的关系却不大相同。强相互作用在粒子间的距离小于  $10^{-15}$  m 时，彼此间的作用力很强，在四种相互作用力中占主要的支配地位。正是由于这种作用力足以克服原子核内质子间的电磁斥力，把原子核内的质子和中子紧紧地束缚在一起，保持了原子核的稳定。这时强相互作用表现为引力。但当核子间的距离减小到大约  $0.4 \times 10^{-15}$  m 时，强相互作用就表现为斥力。但引力相互作用却只有吸引，没有排斥。

#### (7) 既是保守力，又是有心力

万有引力是保守力，因此可以引入引力势能的概念，并用引力势来描述引力场。当系统仅在万有引力作用下运动时，系统的机械能守恒。同时，万有引力又是有心力，当系统仅在万有引力作用下运动时，其角动量守恒。

综上所述，我们可以看出，物质间相互作用的普遍规律是物理学所要研究的最基本的问题之一。而万有引力是自然界四种基本的相互作用中，最早被我们所关注的，而且这种作用具有最大的普适性、作用范围大、能够线性迭加、不能屏蔽、相对强度最小、只有吸引而无排斥等一系列特殊的性质，并与我们的生活密切相关，在宏观和宇观领域起着重大的、甚至是决定性的作用，所以有关万有引力问题的研究在物理学中占有十分重要的地位。

## 2. 引力问题在物理学中所占的地位

4 物理学形成一门独立的学科，并且成为整个自然科学的基础，是从经典力学开始的。在此之前，人类的文明史中虽有不少有关物理的、有价值的创造和发现，但没有形成完整的理论体系，也就是说，还没有构成独立的物理学。16世纪以后，由于航海、战争和工业生产的需要，力学的研究得到了迅速的发展。航海事业促进了天文观测，天体运行的大量精确的数据资料为揭示行星运动的规律奠定了基础。17世纪，牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)总结了以开普勒(Johannes Kepler, 1571—1630)、伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)为代表的许多物理学家的研究成果，建立了牛顿运动定律和万有引力定律，标志着经典力学的诞生。牛顿建立的力学体系经过伯努利(Daniel Bernoulli, 1700—1782)、拉格朗日(Joseph Louis Lagrange, 1736—1813)、达朗贝尔(Jean Le Rond d'Alembert, 1717—1783)等人的推广和完善，形成了系统的理论，得到了广泛的应用并进一步发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支，使经典力学成为自然科学中的主导和领先学科，由此我们可以看出，有关引力问题的研究是物理学发展的一块重要的基石。

在牛顿力学创建以后，万有引力定律经受了实践的检验，取得

了很大的成功。到 19 世纪，经典力学已经相当成熟，特别是海王星的发现，证明了牛顿引力理论的巨大威力，使人们坚信牛顿力学是不可动摇的。在物理学蓬勃发展的过程中，有关引力问题的研究从来也没有停止过。20 世纪初，爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879—1955) 建立狭义相对论以后，深入探讨了引力问题，建立了广义相对论。广义相对论既是狭义相对论的发展，又是牛顿引力理论的发展。爱因斯坦证明了牛顿引力理论是广义相对论的一级近似，而广义相对论是更具有普遍意义的更完善的引力理论。

广义相对论作为新的引力理论得到了实践的支持。爱因斯坦本人首先用它解释了用牛顿引力理论不能完全解释的水星轨道近日点进动问题。接着，他计算了太阳引力场对星光的弯曲，所得结果比牛顿引力理论的相应结果大一倍，但与后来天文观测的结果很接近。爱因斯坦在创建了现代引力理论后，又据此提出了新的宇宙模型，这标志着相对论宇宙学的诞生，也是现代宇宙学研究的开始。20 世纪 60 年代，随着中子星的发现、3K 宇宙背景辐射的确认等一系列科学上的重大进展，现代引力理论及在此基础上建立起来的大爆炸宇宙模型得到了普遍接受。近 20 年来，现代天文学在广义相对论的基础上得到蓬勃发展。中子星的形成和结构，黑洞物理和黑洞探测，引力辐射理论和引力波探测，大爆炸宇宙学等诸多领域都是现代引力理论的主要应用方面。在基础理论方面，量子引力，大尺度时空的拓扑结构等都正在深入研究中。在这种背景下，广义相对论也自然地成了现代物理学中一门重要的基础学科。

纵观物理学发展的历史，可以看出，从牛顿万有引力定律，到爱因斯坦广义相对论，有关引力的理论，形成了物理学中理论发展的一条鲜明的主线。它既是一个古老的课题，又是最现代前沿的领域；既是物理理论最早建立的基础，又是当今理论研究方兴未艾的焦点之一。除了在理论上的重要地位以外，在实践中，万有引力也有广泛的应用。可以说，一切发生在地球上的自然现象和人类所进

行的各种生产活动，无一不与万有引力有关。特别是人造卫星的发射和利用，涉及到现代工农业生产、科学研究、交通运输、军事侦察、无线电通讯，甚至深入到文化传播、政治宣传等上层建筑和人类生活的方方面面。从天文授时到大地测量，从重力探矿、资源普查到气象和潮汐预报，从宇宙探索、航天技术到电视转播、全球移动电话，其应用之广，不胜枚举。万有引力在物理学中所占的重要地位，由此可见一斑。

### 3. 自然界的和谐统一与引力理论的发展

6 前面，我们主要从引力作用在支配自然界的普遍运动规律中占有重要地位这一事实本身，从对引力问题的探索在物理学理论发展中贯穿始终、并对其它相关学科的发展具有深远的影响，以及从万有引力在实际中的广泛应用这几个方面来说明它在物理学中的重要地位。除了这些以外，下面我们再从人类对自然界的探索、从整个自然科学乃至哲学的角度来看，对引力问题的研究还具有更深刻的宇宙观和方法论的意义。

爱因斯坦在评价牛顿力学的历史地位时曾说过：“古代希腊伟大的唯物主义者坚持主张，一切物质事件都应当归结为一系列的有规律的原子运动，而不允许把任何生物的意志作为独立的原因。”“在牛顿之前，还没有什么实际的结果来支持那种认为物理因果关系有完整链条的信念。”他的意思是，物理学依赖于一种基本的信念：物理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。

物理学坚信，自然界是和谐的、统一的，并一直在努力寻找支配宇宙万物的最基本的最统一的规律。牛顿发展了寻找统一的有效物理方法，这就是他在《自然哲学的数学原理》一书的前言中所



阐述的。“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它的现象。”牛顿运动定律和万有引力定律是物理学中的第一次大的统一。在牛顿以前，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同的，有所谓“天界”和“世俗”两个世界之分。然而牛顿通过对运动现象的分析和研究，发现天上行星和月球的运动实际上和地面落体的运动遵从相同的规律，都是由引力引起的。这样，就打破了“天界”和“世俗”的界限，找到了两个世界的统一。物理学中第二次大的统一，是在19世纪由麦克斯韦 (James Clark Maxwell, 1831—1879) 完成的。他建立了电磁场理论，使电、磁和光学现象得以统一。这一理论后来发展为现今的电动力学。

此后，物理学仍然大体上沿着这种研究途径继续寻找着统一的相互作用，并不断取得新的成就。在物理学寻求统一、寻找完整的因果链条的旅途中，一些重要的里程碑如表1-2所示。表中左边为物理学所研究的对象，括号内的数字表示相应的理论建立的年代，有问号的表示至今尚未完成。

表 1-2 物理学发展中的统一

