

物理学基础知识丛书



龚镇雄 编著

漫话物理实验方法

科学出版社

JY1/101/10

物理学基础知识丛书

漫话物理实验方法

龚镇雄 编著

科学出版社

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书以 200 多个有代表性的物理实验为例,从中归纳、提取出一些具有普遍意义的实验方法进行阐述、分析。着重说明实验方法和实验思想对物理实验以及物理学的发展所起的重要作用。

本书适宜于从事物理实验、物理教学的大、中学教师和大学理科学生阅读。

物理学基础知识丛书 漫话物理实验方法

龚镇雄 编著
责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京东黄城根北街 18 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

★

1991年12月第 一 版

开本: 787×1092 1/32

1991年12月第一次印刷

印张: 5 7/8

印数: 0001—3 800

字数: 120 000

ISBN 7-03-002596-2/O·488

定价: 4.60元

《物理学基础知识丛书》编委会

主 编：马大猷

副主编：周世勋 吴家玮（美 籍） 汪 容

编 委：王殖东 陆 埏 陈佳圭 杜东生 张元仲
赵凯华 赵静安 俞文海 钱 玄 潘桢镛

*

*

*

*

*

本书责任编辑：赵凯华

丛 书 序

1978年8月，中国物理学会在庐山召开年会，不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的重大作用，建议中国物理学会与科学出版社合作，编辑出版一套《物理学基础知识丛书》，有计划有系统地普及物理学的基础知识和物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此，中国物理学会理事会进行了认真讨论，积极热情地支持了这一建议，于是，就在风景绮丽的庐山，在中国物理学会和科学出版社的共同主持下，正式成立了本丛书的编委会，讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划，正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律、物质的结构及其相互作用，它是许多科学技术的基础。从本世纪开始，物理学经历了极其深刻的革命，从宏观发展到微观，从低速发展到高速，由此诞生了量子物理学和相对论，并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来，物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就，不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用，使人类掌握了新的能源；半导体科学技术的发展，导致了计算技术和自动控制系统的革命；激光的出现焕发了经典光学的青春；凝聚态物理学的发展，使人们不断创造出许多性能大大提高的材料……；因此，向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展，乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要，我们编辑出版本丛书的

目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖，风格多样，勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动、深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、陆学善等同志的热情赞助和关怀。香港科技大学校长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作，并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

1980年12月于北京

序

实验是自然科学的基础。物理实验在诸多自然科学学科中又有其特殊重要的地位。物理学是一门实验科学。物理学新概念和规律的发现和确立主要依赖于实验。物理学上新的突破常常是通过新的实验技术和方法的发展，从而促成科学技术的革命。第一次产业革命是如此，第二次产业革命亦是如此，今后的发展还将是如此。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在各个自然科学领域和技术部门，以至于自然科学以外的学科，并且日益向生产和生活的各个领域、各个方面渗透。

迄今以来的物理学发展中，有过许许多多的卓越的实验，具有极其丰富和精采的物理思想，揭示了解决问题的途径和方法。这些思想和方法已经超越了各个具体的实验而有着普遍的指导意义。怎样挖掘这些分散在各个实验中的思想、观点、方法的精华，加以分析和综合、抽象和概括，迄今为止还没有人做过，而龚镇雄同志在本书中作了初步有益的尝试。它既不同于具体测量某个物理量的测量方法，又不同于一般自然辩证法方法论的观点，而是属于“中间层次”的一些实验思想和方法。因此，比较实际、贴近，又有一定高度。在探索物理实验作为一门学科的自身规律上是有所前进的。

《漫话物理实验方法》一书，纵览了物理学发展中各个时期，特别是近代和现代的一些事例，包括了从前沿的探索研

究到传统的教学实验，赋予一些教学实验以新的认识，涉及了从理论研究到实验方法和技术的应用。通过几百个例子，纵横联系，具体而生动地说明了问题。这将对开拓读者的思想有所启发。

作者在几十年物理和实验教学以及科学研究工作中积累了丰富的经验，又不停留于已有经验上，而予以总结提高，去探索物理实验各个方面的规律。这些探索，包括本书的内容，虽不成熟，但是这种立足于本职工作、认真做学问、勇于开拓和创新的精神是值得鼓励的。

在适应当前改革的要求，提倡解放思想、打破框框，培养具有创造能力的新型知识分子的形势下，我愿把本书介绍给大家。

虞福春

1989年于北京

前 言

物理学是一门实验的科学，离开了物理实验，就无法去谈物理学的发展。翻开物理学的历史，在其各个分支领域里，曾经有过许许多多卓越的实验。它们以其巧妙的物理构思，独到的处理问题和解决问题的方法，精心设计的仪器装置，完善、合理的实验安排，高超的测量技术，对实验数据的悉心处理，无懈可击的分析判断等，留下了不可磨灭的踪迹。有过许多专著或文章，有的按物理学发展的进程研究实验，有的剖析某些著名实验的内容，并说明其在物理学发展中曾经起的作用。近几年，还翻译出版了一些这样的书籍。而本书却不打算再遵循这条思路，它的作法是，从诸多历史上著名的实验，从物理学发展前沿的一些实验，以及从人所共知的高等院校教学实验中归纳、提取一些具有普遍意义的实验方法和从事实验设计或进行实验的指导思想，并选择有代表性的实验为例，以方法和观点作为线索来阐明问题。因此，本书不可能把物理学中的重要实验都提及，而且，为了说明某一个观点而举的例子，也并不意味着是这个实验的全部。

每个实验都会有自身的一套方法去测量相关的物理量，我们把对某个物理量的具体测定方法叫做测量方法，把在各种实验中通用的方法叫做实验方法。同时，把一些在选用实验方法、进行实验设计、安排实验或者在实验中进行调节、测量时具有普遍意义的思想，我们称之为实验思想。本书着重说明的是这些实验方法和实验思想。文中将以200多个实验

或片断为例进行分析阐述。

实验作为一门科学，它包括有实验方法、实验条件、仪器装置、实验设计、操作测量、数据处理以及实验分析等诸多方面，每一个方面都有其自身的规律，并形成许多实验思想。本书不能面面俱到，对实验方法及实验思想以外的其他方面，虽不可避免地会有所涉及，但不作详细的阐述和展开。

这样的写法是一种新的尝试，其中在很大程度上包括了作者自身的观点。因此，我热切地希望能同读者交流、讨论，以期有些观点得到进一步完善或修正。

本书的第一部分包括第一、二章，简述物理实验方法的发展及其在物理学发展中的作用。第二部分包括第三至第六章，介绍常用的一些实验方法。第三部分从第七章开始到十二章，着重介绍具有普遍意义的实验思想。第十三章介绍在实验的仪器装置设计中的一些卓越思想。第十四章是结束部分，讲当前物理实验方法发展的趋势和展望。

在著述过程中，得到虞福春、高崇寿，赵凯华等先生的指导和帮助，马树英同志绘了插图，胡迎宾同志协助整理了一些资料，卓钰如、郭奕玲同志提供并校核了部分资料，谨在此对他们表示衷心的感谢。

龚镇雄

1989年12月于北京大学物理系

目 录

丛书序	i
序	iii
前言	v
第一章 物理学的真正开端	1
古代的自然哲学 (1) 物理实验方法的兴起 (2) 伽利略的实验方法和科学思想 (4)	
第二章 物理学发展中的实验与理论	7
实验事实的总结 (7) 物理学中的争论与实验 (8) 修正错误的依据和发展理论的起点 (9) 从美好的假说到科学的定论 (11) 实验—理论—实验..... (12) 理论与实验的结合和统一 (14)	
第三章 用实验检验理论的方法	17
直接检验 (17) 间接检验 (19) 间接检验的潜在危险 (23) 怎样才算“验证”了一个物理公式 (25)	
第四章 寻求物理量之间相互关系的方法	27
从实验直接寻求两个物理量之间的关系 (28) 用作图方法拟合曲线 (30) 逐差法和平均法 (31) 回归法 (33) 同一组数据可以得到不同的经验公式 (35) 用量纲分析方法建立公式 (38) 凑出一个公式来 (39)	
第五章 模拟法和示踪法	42
小小音乐厅——几何模拟 (43) 阿波罗 6 号上天之前——动力相似模拟 (45) 地震模型——物理量之间的替代 (47) 电路上的模拟实验 (49) 物理模拟的条件 (52) 在计算机上做实验——计算机模拟 (54) 模拟方法的局限性	

(57) 空间示踪和时间示踪 (58)	
第六章 减小测量误差的几种常用方法.....	61
相对测量法 (61) 直接替代法 (64) 零示法 (66) 交	
替测量法 (69) 定点测量法 (72) 累计测量法 (73)	
第七章 迂回战术.....	75
把不可测的量转换为可测的量 (75) 把测不 的量转换为	
可测准的量 (77) 用测量改变量替代测量物理量 (80)	
绕过一些不易测准的量 (84)	
第八章 判定和确认.....	87
实验要能得出明确的结论 (87) 不能凭单一的实验下结论	
(90) 实验必须能够重复 (92) 用不同的方法去确认	
(94)	
第九章 测的是它吗?	97
理论模型失实 (97) 当你把探测器放进去的时候 (99)	
仪器使用不当 (102) 测量安排不妥 (104) 采集的数据不	
反映实际 (106) 数据处理或判断失误 (107) 布伦德诺院	
士胆怯了 (108) 减少不确定因素 (109)	
第十章 数量级的学问.....	112
伽利略测量光速为什么失败 (113) 估算一下有没有实现的	
可能 (114) 另找出路 (116) 这是可以略去的 (117) 基	
本误差与小量 (119) 千分之一之差 (121) 并非每个量都	
要测得越准越好 (122) 从数量级就可以作出判断 (125)	
第十一章 积累、放大, 提高信噪比和灵敏度.....	128
机械放大 (128) 时间的延长和细分 (130) 电信号的放大	
和信噪比的提高 (131) 积累和选择 (133) 从静态测量到	
动态测量 (135)这里为什么要降低灵敏度 (136)	
第十二章 寻求最佳方案.....	138
找好地点 (138) 把握时机 (140) 最经济的试验方案和正	
交设计 (141) 恰到好处的选用仪器(143) 参量选择(145)	

从物理实质上考虑作出最佳安排 (148)

第十三章 实验装置里的卓越构思..... 151

不是物体的物体和不用容器的约束 (151) 用不散热解决散热问题 (153) 分身和反馈 (154) 把误差抵消掉 (156)
大自然的赐与 (157) 把地球利用起来 (158) 让天体为我服务 (160)

第十四章 趋势和展望..... 162

更大和更小 (162) 集体的综合事业 (166) 结合、渗透和应用 (167) 走向空间 (169)

第一章 物理学的真正开端

古代的自然哲学

自古以来，不论是在外国还是在中国，人们希图对周围生活中所发生的自然现象作出一定的解释，从而产生了自然科学的萌芽。人们在探求真理。但是，当时萌芽状态的自然科学常常同哲学联系在一起，掺和着主观和臆测的成分。虽然，对于某些自然现象和规律的解释，从今天看来，有某些符合科学的道理，或者含有某些朴素的合理的成分。例如，有过各式各样的地球学说，来解释天、地、日、月、星辰和一年四季等现象。古希腊时代，有人认为我们居住的地球是围绕着某个宇宙中心转动的。阿里斯塔克认为地球每天绕一个轴自转，每年绕太阳旋转一周。又如，古巴比伦和古埃及人就有认为世界是由几种元素组成的。中国在西周时期有万物是由金、木、水、火、土“五行”物质构成之说，而后，也有认为水是万物和诸生之源，又有宇宙万物统一于“气”的“元气说”等。古希腊的留基伯和德谟克利特认为宇宙间万物都是原子组成的，原子是不可分割的物质，宇宙间有无数的原子，它们从古以来就已经存在，不能创造出来，也不能毁灭掉。构成各种物质的原子的大小、形状、重量都各自不同。古罗马人卢克莱修认为原子是不可分割、不全相同的小固体，所有的原子都处于永恒的运动之中，数量是无限的。我国春秋、战国时期的墨家也提出过物质不可再分的“端”的思想，与原

子概念相似。

以上这些说法，虽然在几千年以后又得到一定程度的“回归”，如日心说的确立，道尔顿原子论的建立，1851年傅科用傅科摆证实了地球自转等——当然，不是原来意义上的回归，但是，这些毕竟是猜测和臆想，没有科学的论证或实验的检验，因此，不能算是科学，只能认为是属于古代自然哲学的范畴。

物理实验方法的兴起

在物理学发展的漫长历程中，不论是在中国还是在外国，有不少人做过许多实验或观测，作过各种解释，也提出过种种理论，还制造出不少种仪器。古巴比伦人曾用日晷和水钟计时，发明了梁式天平；古希腊人阿里斯托芬有过用玻璃点火熔化石蜡的记述；欧几里德记载过用凹面镜聚焦太阳光的试验；阿里斯塔克第一次测定了太阳、地球、月亮之间的相对距离。

特别要提出的是公元前 2, 3 世纪，阿基米德除了做杠杆、滑轮等实验以外，还做了浮力实验，建立了浮力定律。他在《浮体》一文中曾这样叙述：浸没在水中的物体减少的重量¹⁾等于它所排开的水的重量，浮体在本身的重量中排除了水的重量。这是一个从实验总结为理论的定量实验。即迄今为止还被普遍使用的“阿基米德原理”。

而后，希腊人埃拉托斯特尼第一次测出了地球的大小。他计算的地球两极的直径与现在的数字很相近。希帕克和托

1) 确切地应为视重。——编者注

勒密等进行过大量的天文观测。罗马人克里奥梅德斯做过光的折射实验，他说，空容器底上的戒指正好被容器的边沿挡住了视线，当容器注满水时戒指就可见了。托勒密还系统地测量了光的入射角和反射角，将其结果列成一个表。阿拉伯人阿勒·哈增做过圆柱面镜、球面镜、锥面镜的反射和折射实验，等等。

我国古代也有许多关于物理实验和应用的记载。例如，《墨经》上记有小孔成像，平面镜、凸面镜、凹面镜反射成像的大小，像的正倒与位置的关系等实验。近年出土的湖北随县曾侯乙墓中的编钟、编磬，说明战国初期，我国的声学及乐器制造已有非常高的造诣。汉代开始就有许多关于杠杆、滑轮应用的记载，如记里程车、“被中香炉”（一种常平支架）、张衡的地动仪等。东汉时期利用平面镜组合，制造了开管式潜望镜。《淮南子》中记述了用凹面镜阳燧等取火。汉代已有了天平式的验湿器。之后，还有不少关于计时器、虹吸管的记载。唐代一行进行了大规模的测地工作。南唐的谭峭在《化书》中记述了双凸、双凹、平凸、平凹四种透镜的成像。宋代的张世南做过桐油的表面张力实验。宋朝的沈括造过浑仪、玉壶、浮漏、铜表等天文观测及计时仪器，他还做了磁学、声学、光学方面的仪器，最早发现了地磁偏角，这些均记载于《梦溪笔谈》等著作中。13世纪，赵友钦在其《革象新书》的“小罅光景”中描述了一个大型的光学实验，正确地说明了光源的大小、强度，小孔的大小、形状，光源与小孔间的距离与成像大小及像的亮度之间的关系。元代的陈椿曾用莲子、鸡蛋和桃仁测量盐水的浓度。清代更大规模的测地工作，首次把长度单位与地球经线联系起来，定1800尺为1里，200里合地球经线1度，等等。我国历代均有许多天

文观测仪器，而且有系统的观测记录。我国的地震记录资料也是极丰富、珍贵的。

由上所述，不论是在外国还是在中国，已经做过大量的实验工作。无论是从（1）系统的观测和记录；（2）在人为的条件下重现物理现象；（3）确定量度标准和量度仪器；（4）制造实验和观测仪器方面来看，都能够称得上是物理实验，而且其中有些还是很卓越的。但是，（1）这些实验毕竟还是零星的；（2）定量的实验较少，而定性的实验较多；（3）大多数实验没有提升概括出理论，而多只限于现象的描述，或者只作了一般的解释而没有形成系统的理论；（4）即使形成了一些理论，也没有再用实验去检验它。

伽利略的实验方法和科学思想

物理学发展到公元16，17世纪，吉尔伯特和伽利略等一批科学家，把实验方法与物理规律的研究结合起来，对物理学的发展作出了划时代的贡献。伽利略是其中杰出的代表。

伽利略作了摆的实验，说明单摆的周期与摆长的平方根成正比，而与摆的质量和材料无关。他做了斜面实验，验证了物体在重力作用下作等加速运动的性质，总结出物体从静止开始作等加速运动时，运动的距离与时间的平方成正比的普遍公式，并且利用几何关系，建立了等加速运动的平均速度与末速度关系的数学表达式。他还根据实验事实或利用演绎推理，得出了许多物理学的理论结论。

伽利略的实验方法和实验的科学思想有以下几个特点：

1. 把数学与实验密切地结合起来，把各个物理量之间的关系用数学表达式表示出来，揭示了各个物理量之间的