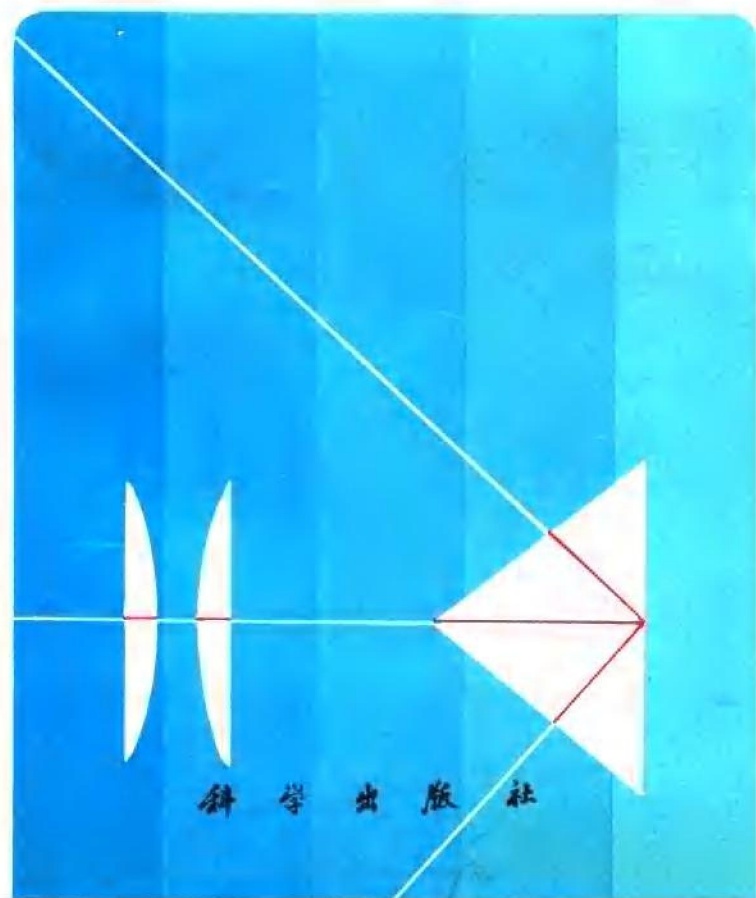


郭奕玲 著

大学物理中的 著名实验



大学物理中的著名实验

郭奕玲 著

科学出版社

1994

(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

物理学是以实验为本的科学。本书选取大学物理中的 27 个曾在物理学发展中起过重要作用的实验, 目的在于通过对这些实验的目的意义、方法、技巧以及有关的历史背景的介绍, 帮助读者提高对物理实验的认识, 增进读者对物理学的理解。

本书可供高等院校有关专业的师生及从事物理学史研究的人员阅读。

581178

大学物理中的著名实验

郭奕玲 著

责任编辑 郑德平

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

北京怀柔黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1994 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32
1994 年 8 月第一次印刷 印张: 10 7/8
印数: 1—3 000 字数: 235 000

ISBN7-03-003807-X/O·668

定价: 9.70 元

代序：物理学是以实验为本的科学*

“物理学是以实验为本的科学”，这一精辟论述出自诺贝尔物理学奖获得者、理论物理学家杨振宁教授的一则题词，它表达了物理学界的共同见解，抓住了物理学的根本特征，很多物理学先辈都有类似看法。在物理学的发展中，实验起过重要作用，现在正在起着、将来也还要起重要作用，这一点对于物理学家大概是没有争论的。但是在物理教育中是否贯彻了这个精神，学生在学了物理之后，是否都有比较正确的认识，却是很成问题。怎样使学生重视实验，认识实验以至于热爱实验工作，需要我们认真对待。

1. 提高认识的重要性

现在大家正在探讨如何通过物理教学贯彻辩证唯物主义和历史唯物主义，提倡在教学过程中育人。正确认识理论与实践的关系，当然是其中的一个重要方面。

物理学是不是以实验为本，它涉及到什么是物理学这一根本性问题。学习物理学，不了解物理学是什么；不懂得物理学的知识是从那里来的；不认识物理学仍是一门正在发展中的科学；不了解它的发展既要靠理论的研讨，更要靠实验的探索，我想这样很难达到学习物理的真正目的。要知道，物理

* 本文是作者在 1990 年国家教委主持召开的“物理学史与物理教学”讨论班上所作报告。

学不仅要为后续课程准备必要的基础知识,也要为学生正确认识世界,建立正确的世界观,掌握正确的方法论打好基础.物理学不仅是自然科学的基础,也是人类文化的重要组成部分.

物理概念、物理定律以及把概念和定律经数学逻辑联系在一起的理论体系无疑是物理学的主体.但是这些概念、定律和理论体系必须以大量客观事实为基础,必须正确反映客观规律,必须经受实践的检验,并且通过实践检验确定其适用范围.不仅在历史发展的过程中是这样,在教学中也应充分阐明.如果只是从概念到概念,一个理论接着一个理论,在学生面前,物理学只剩下一个空的骨架,他们就可能误认其为绝对真理,把物理的精华当作教条来背诵.我们提倡用历史的观点来认识物理学,从历史的角度来讲授物理学,正是为了避免这样的后果.要全面阐述物理学发展的辨证过程,当然要把实验和理论之间的相辅相成、互相促进的关系充分加以揭示.做到这一点,对提高学生的认识,增进学生对物理学的理解必然大有益处.

2. 怎样提高对实验的认识

物理教学中实验是重要的组成部分,从中学到大学都普设物理实验室.国家花了很大力气生产制造实验仪器,装备各类实验室,定员定编.许多大学物理实验单独设课,考试评分,措施可谓得力矣.这些年来,实验教学的质量确也有所提高.但是有了措施,并不一定就能保证取得良好的教学效果,还需要做许多深入细致的工作.其中包括端正学生对实验的认识,提高学生对实验的兴趣.单独设课,有利也有弊,讲课

与实验脱节,很可能使实验教学更趋向技术性,课堂则更理论化.作为基础教学,这样发展下去,恐怕会产生不良的副作用.

在目前的条件下,只有讲课和实验课双方都重视全面地教育学生,才有利于学生的成长.换句话说,提高学生对实验的认识,不仅是实验教学的任务,也要在讲课中注意贯彻.下面分几方面来探讨这个问题.

(1) 在讲课中要讲清理论的基础是实验.

量子论的建立总要涉及黑体辐射、光电效应和固体比热.学生在学习过程中经常会提出这样一些问题,为什么是在 19, 20 世纪之交发生物理学的这场革命?为什么量子概念是从热辐射这一特殊领域首先产生?有没有历史的必然性?我认为,重要的方面就是当时实验已达到特定的水平,能够反映微观世界的特性,有的甚至反映得很精确.诸如光谱学,包括可见光谱和红外光谱;电磁波的发现和真空、低温、电磁测量等技术的发展,这就使人们有可能进行热辐射、光电效应、低温下固体比热等方面的实验研究,从而得到一系列经典物理学无法解释的新结果,这些必要的历史发展背景应该通过教学向学生讲清楚.

至于为什么量子概念注定要从热辐射这一领域首先产生呢?我认为,这是因为热辐射是经典物理学中充分发展的两个分支——热力学和实验光谱学的结合点,可以说是“光学与热力学结合生出来的婴儿”,它既有热力学普遍性的品格,又有光谱学测量精密的特点.红外和热辐射测量经过赫谢尔、兰利、卢梅尔和鲁本斯几代实验物理学家的努力,达到空前的精确度,可以跟理论在宽广的波长和温度范围内精确地进行比较,终于在 1899 年证明理论和实验在长波方面有系统性的

偏差,迫使普朗克引进能量子假设. 这一事件可以作为阐明物理学基础是实验的一个有力例证.

玻尔原子理论也有其实验基础,除了上述量子论的诞生以外,还有光谱学的发展和原子核的发现. 玻尔适时地将这三方面的成果作了综合,才取得划时代的成果.

电磁学的发展也是一个极好的例子. 麦克斯韦电磁场理论建立在库仑、安培、奥斯特、法拉第等人大量实验研究的基础上,这是人所共知的事实.

爱因斯坦的狭义相对论也有其实验基础. 试问:如果没有光速的测定,爱因斯坦怎么会去作“追光”的思考;如果没有对电磁现象(包括单极感应)进行过大量实验研究,怎么会发现电磁感应的不对称性? 如果没有人们对以太的长期探索,怎么能肯定不存在绝对坐标系?

总之,实验是物理理论的基础,这一点在讲课中应充分体现.

(2) 通过实例反复阐明,理论和实验的相互作用是推动物理学发展的动力.

实验是理论的基础,并不等于说理论可以直接从实验得到. 例如,简单地把爱因斯坦相对论的产生归结于迈克耳孙-莫雷实验的零结果,不但不符合历史的本来面目,也缺乏逻辑的说服力. 理论的产生和发展不能用一个简单公式来表示,但它在发展过程中必须不断从实验得到事实的补充和航向的修正. 理论源于实验,却高于实验,具有高度概括性和普遍性,但它不能违反直接经验,必须接受实验的检验. 实验可以否定旧理论,支持新理论,对相互抗衡的理论作出判决. 当物理学的现有理论与新的实验结果发生矛盾时,或者当建立在不同实验基础上的不同领域的理论相互冲突时,靠理论的演

绎和修补往往不能解决问题，这时摆在物理学家面前的任务就是要审查理论的立足点，提出新的假设，建立新的理论体系，于是物理学就发展了。这种发展是跳跃式的，往往不能靠逻辑来说明。新的理论建立之后，最重要的事情是寻求实验的支持，以判定理论是否符合实际。实验—理论—实验，这就是物理学发展的基本模式。

(3) 有目的地选择几个著名实验，介绍其设计思想、实验结果和历史沿革，藉以增强对实验的认识。

如上所述，物理学本来就是在理论与实验相辅相成、互相促进的矛盾运动中前进的。几十年前的教材，往往比较系统地介绍历史上的重要理论和著名实验。现在物理学发展了，教学内容不断更新，不断提炼。在有限的学时里，不可能、也没有必要重温历史上走过的道路。但是完全把实验排除在外，会给学生造成错觉，以为物理学就是一门纯理论的科学。我认为，教材和讲课中如果能保留某些实验，重点加以介绍，既可以增进学生的认识，也可以使物理教学更有生气。所谓介绍，当然不是轻描淡写地提提实验名称，而是要阐述这些实验的构思，设计者的匠心，技术之精湛，方法之巧妙和结果之精确，让学生对实验的设计思想和所起的作用，确实有所体会。这些介绍留给学生的印象也许会远远超出知识性的内容。

例如：佩兰的布朗运动实验。可以介绍当时的理论背景，佩兰如何筛选颗粒，如何统计数据，用了多少种方法，解决了什么问题？为什么授给他诺贝尔物理学奖？

密立根的光电效应实验极为精采。这个实验有什么意义？密立根解决了什么技术关键？他如何处理数据？还可以讲讲他对待实验结果的态度。

在讲到某些基本常量时,可以介绍测定这些常量的历史和最新方法.

例如:里德伯常量的测定.当年玻尔就曾利用这个常量为其理论找到令人信服的证据.几十年过去了,这个常量越测越精,由于激光光谱学的发展,消除了多普勒效应本底,测量精确度现在可达12位数字.

讲到普朗克常量时,可以介绍叶企孙1921年的工作.他得到的结果是20年代最精确的数值.

库仑定律的实验验证,也是意义深远的课题.从卡文迪许的同心球实验和麦克斯韦的改进,到当代的测量结果,如果再讲讲平方指数偏差的理论含义,更会使学生感到内容丰富、眼界开阔.

(4) 在讴歌理论家的功绩的同时,不要忘记也对实验家的事迹作些说明.

物理学史中著名理论家在作出里程碑贡献时思想上的飞跃,会给后人留下发人深省的启示,众多实验家创造性劳动和艰苦奋斗的科学生涯也会产生巨大的反响.焦耳测热功当量,历经三十余年;迈克耳孙测定光速,精益求精;卢瑟福研究 α 射线,知难而进,由此发现了原子核;法拉第研究电磁现象;昂纳斯建立低温实验室;盖德发明多种真空泵,这些都是脍炙人口的历史佳话,可以用来作为课堂上的插曲.讲课的系统性当然必须保证.在不影响课堂进度的前提下,适当作些锦上添花,难道不好吗?当然,要谨防生搬硬套.我认为,关键在于教师本人对实验是否有深刻的认识和体会.

(5) 在实验课的教学中,也有很多机会可以利用物理学史进行教育.

首先要说明,不少实验题目本身就是物理学发展中的重

要实验,例如:电子荷质比,弗兰克-赫兹实验、密立根油滴实验、氢光谱、塞曼效应,还有低温实验、高真空实验、热功当量实验等等。在这些实验进行之前,如果重温该实验在历史上所起的作用,历史背景和当年的做法,就可以更引起学生的兴趣,更掌握实验的物理思想,甚至会以更高的思想境界来对待实验工作。

在实验绪论中,可以引用前辈的实验数据作为分析误差的事例,可以列举著名物理学家的实验记录,从而展现他们严谨踏实的科学作风,也可以分析几个大家熟悉的著名实验,突出这些实验构思的巧妙和技术的精湛。

有的实验指导书在各实验的前言中列举该实验的历史意义、理论价值和有关的前沿问题;有的列出参考书目,供学生查阅;有的在思考题中或实验任务中特意加进类似的内容,都会对学生的思考有启发,值得推荐。

在实验课的辅导过程中,教师有很多机会可以和学生讨论与实验有关的问题,例如:在电桥、电位计,在迈克耳孙干涉仪、法布里-珀罗标准具等基本测量技术中,在核磁共振、光泵磁共振、激光稳频等近代物理实验中,都有大量可以启发学生思考的问题。

实验课上结合物理学史的内容,是一个很值得探讨的问题,怎样突出实验的物理思想?怎样使学生感到自己正在模仿前人研究物理问题?怎样使学生体会实验工作的复杂性?怎样使学生学习进行科学研究的方法?实验物理学史可以提供许多有益的资料。

作为一名大学物理教师,我深深感到教育学生重视实验、认识实验以至于热心于实际工作,是我们义不容辞的职责。有两个数据可供参考。90%以上的物理学工作者是在

实验物理学的各个领域里工作；70%以上诺贝尔物理学奖获得者是由于实验方面的贡献而得奖。我们要以身作则，鼓励学生将来从事科学实验。1977年因发现J/ψ粒子获诺贝尔奖的丁肇中教授曾语重心长地讲过这样一番震撼人心的话：

“我是在旧中国长大的，因此想借这个机会（按指他得诺贝尔奖的仪式）向在发展中国家的青年们强调实验工作的重要性。

中国有句古话：‘劳心者治人，劳力者治于人’，这种落后的思想，对在发展中国家的青年有很大害处。由于这种思想，很多在发展中国家的学生们都倾向于理论的研究，而避免实验工作。

事实上，自然科学理论不能离开实验的基础，特别是，物理学是从实验产生的。

我希望由于我这次得奖，能够唤起在发展中国家的学生们的兴趣，而注意实验工作的重要性。”

丁肇中教授这段话值得大家认真学习。

目 录

一、引力常量的测定和引力定律的实验检验·····	(1)
二、气体常量的测定·····	(25)
三、布朗运动与佩兰实验·····	(34)
四、分子速度分布律的实验验证·····	(45)
五、阿伏伽德罗常量的测定·····	(61)
六、氦的液化和超导电性的发现·····	(71)
七、库仑定律的检验·····	(80)
八、运动电荷的磁场·····	(88)
九、质量与速度的关系·····	(100)
十、迈克耳孙-莫雷实验 ·····	(110)
十一、热辐射·····	(124)
十二、光电效应·····	(139)
十三、塞曼效应·····	(152)
十四、密立根油滴实验·····	(161)
十五、X 射线衍射的发现·····	(176)
十六、匹克林谱系之谜·····	(185)
十七、弗兰克-赫兹实验 ·····	(196)
十八、施特恩-格拉赫实验 ·····	(203)
十九、康普顿效应·····	(211)
二十、拉曼效应·····	(224)
二十一、物质波实验·····	(235)

二十二、里德伯常量的测定.....	(254)
二十三、普朗克常量的测定.....	(267)
二十四、电子 g 因数的测定.....	(280)
二十五、从微波激射器到激光器.....	(295)
二十六、原子钟和超精细结构.....	(312)
二十七、穆斯堡尔效应.....	(325)

一、引力常量的测定和引力定律的 实验检验

引力常量 G 是基本物理常量之一，其精确知识可以对宇宙学给出重要信息，并对引力理论提供支持。

但是引力是物理学中遇到的最弱的一种力，要在实验室中进行引力测量是十分困难的。二三百年来，人们尝试了许多方法，测量引力常量的精确度总是难以提高。即使到了技术相当发达的 20 世纪末，其不确定度仍旧徘徊在 10^{-4} — 10^{-5} 之间。1986 年基本物理常量平差采用鲁译 (G. G. Luther) 和托勒 (W. R. Towler) 用扭摆法测定的引力常量，值为^[1]：

$$G = 6.67259(43) \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$$

不确定度为 64ppm，比大多数基本物理常量的不确定度竟大了 2—3 个量级。幸好引力常量与其它物理量尚未建立联系，与平差的其它部分完全无关，不影响全局。

引力定律是自然界的基本规律之一，在物理学中占有极其重要的地位。然而，应该指出，自从牛顿提出引力定律以来，尚未对之作出全面的检验，还有不少因素有待考察。例如：究竟引力常量 G 会不会随时间变化？它与距离有没有关系？与物质成分有没有关系？等等。所以，引力定律的实验检验，一直是物理学界普遍关心的重大课题之一。

1. 引力常量的测定

迄今用来测量引力常量 G 的实验大致可以分为三类：

(1) 大尺度实验，测量地球与山或部分地壳层之间的吸引力

1738 年,天文学家布盖(P. Bouguer, 1698—1758)曾在秘鲁测量子午线时,发现由于肯坡拉索(Chimborazo)山的影响,铅垂线的方向偏了 8 秒. 他判断这是万有引力的作用. 根据初步数据,他估算了山脉和地球的相对密度. 布盖的工作激励麦斯凯林(N. Maskelyne, 1732—1811) 30 年后在苏格兰的伯斯夏(Perthshire)找了一座形状规则的花岗岩山做实验. 这座山名叫希哈良(Schiehallion)山,陡峭绝壁,高 3547ft (约 1088m). 他在山的两侧各选一个观测站 A 和 B,如图 1.1. 从天文观测得知,AB 两站的纬度相差 55 秒;从大地勘测却得纬度差为 43 秒,他认为,两者相差 12 秒是由于山脉的万有引力,使铅垂线有所偏离. 经过繁杂的计算,得到的最后结果为:地球密度约为水的 4.5 倍.

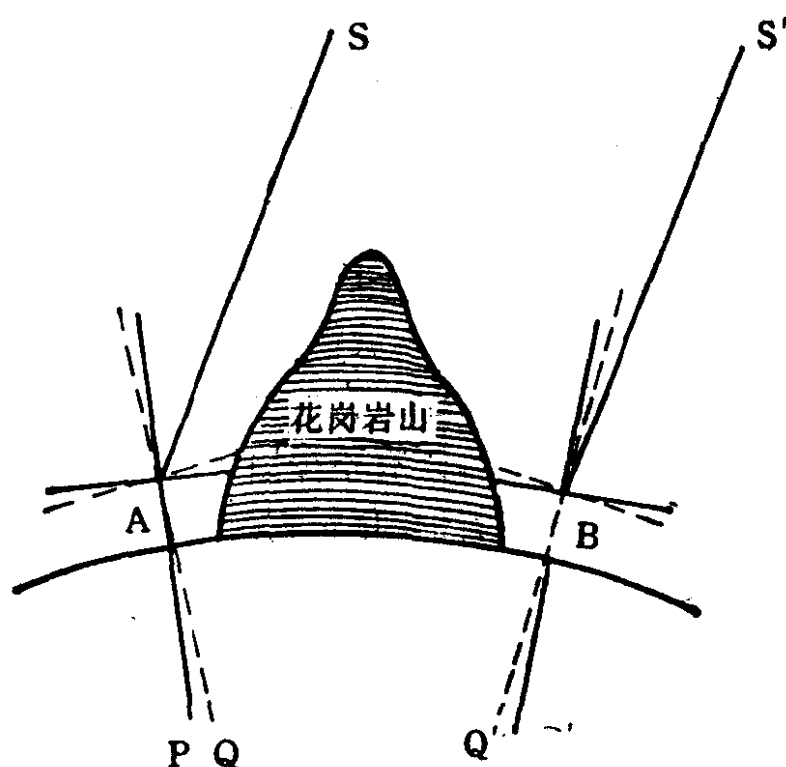


图 1.1 麦斯凯林测量地球密度示意图

(2) 测量地表不同深度的重力加速度，可以计算引力常量

设地面上的重力加速度为 $g(0) = GM/r^2$ ，而深度为 z 处的重力加速度

$$g(z) = G(M - \Delta M)/(r - z)^2$$

其中 M 为地球质量， r 为地球半径。

只要知道地壳层质量 ΔM 在整个地球质量 M 中所占比率，就可以从上面两个式子求得 G 。

此法最早是 1828 年由英国人爱里 (Airy) 在煤矿井中进行，矿井深 400m，用单摆测得不同深度的重力加速度后，得到引力常量

$$G = 5.7 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$$

1980 年斯塔赛 (F. D. Stacey) 等人在澳大利亚一座 700m 深的矿井中重新用这个方法测量引力常量，得到

$$G = 6.712(27) \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$$

5.7	1928 爱里
7.7	1883 冯·施特内克
5.4	1885
6.712 ± 0.027	1980 斯塔赛

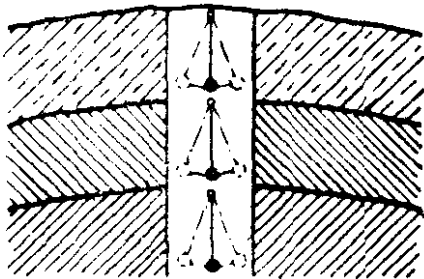


图 1.2 矿井中测引力常量

引人注目的是，据 1987 年统计的数据，凡是在矿井中或在钻孔中测得的，都比从天体运行推算或实验室测量的偏大^[2]。

(3) 用梁秤法测物体间的引力

1878 年德国实验物理学家焦利(P. J. G. v. Jolly)首创此法. 他把两个盛有 5 kg 水银的球形容器作为被吸物体, 悬挂在横梁长 60cm 的天平两端. 两瓶水银高度相差 21m, 中间放置一重 5775kg 的大铅球. 从指针的偏转, 计算得出引力常量 $G = (6.447 \pm 0.11) \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$.

1888 年里查兹(Richarz)等人用这个方法得过很好的结果. 他们的装置如图 1.3. 吸引物体是重约 100t、长宽高均为 2 m 的铅块(以平行铅管组成). 被吸物体是 0.67kg 的两个小铅球, 小铅球悬挂在长 23cm 的横梁两侧. 在未加铅块前, 小铅球先放在托盘 A, D 中, 后放在托盘 C, B 中称衡, 以修正 AC, BD 两高度重力加速度不等的影响. 加铅块后重复上述测量, 由此即可算出引力常量. 他们得到

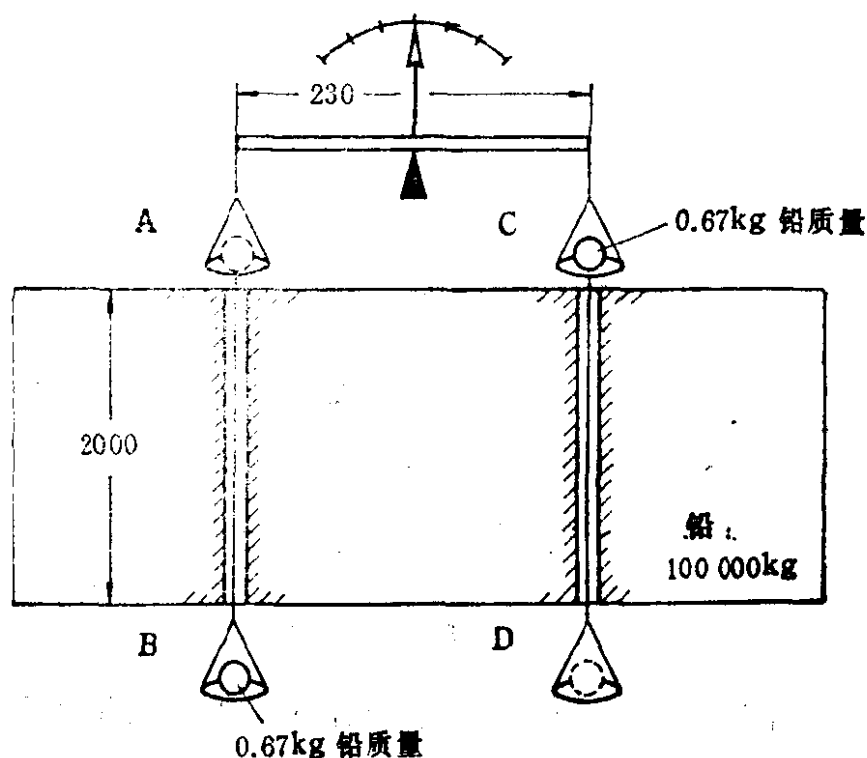


图 1.3 里查兹等用梁秤法测引力常量

• • •