

电子图书



信息技术的结晶

人类文明的载体

网络的基本资源

序

物理学发展史是一块蕴藏着巨大精神财富的宝地。这块宝地很值得我们去开垦，这些精神财富很值得我们去发掘。如果我们都能重视这块宝地，把宝贵的精神财富发掘出来，从中吸取营养，获得教益，我相信对我国的教育事业和人才培养都会是大有益处的。

值此郭奕玲、沈慧君两同志的《物理学史》一书出版之际，我想谈三点看法：

一、科学上没有平坦的大道。我们要通过物理学史的介绍，向学生讲清楚，科学经历的是一条非常曲折、非常艰难的道路。然而，我们的教师在对学生进行教育的时候往往是应用经过几次消化了的材料来讲授，或者经过抽象的理论分析加以表述，把已有的知识系统归纳，形成简明扼要的理论体系，这当然是必要的，但是这样的教学方法，往往会使学生对科学概念的产生和发展引起误解，以为什么结论都可用数学推导出来，失去了对观察和实验的兴趣。这样的结果使学生们不了解科学是怎样来的，时间长了，等到他自己从事教学时就很容易把科学当作一门死科学来教。今天我们科学界有一个弱点，这就是思想不很活泼，这也许跟大家过去受的教育有一定关系，我在1981年给《物理教学》编辑部的信中就提出过这个看法。

我认为，在物理教学中适当增加一点物理学史的内容，或者在教学计划中增加一门物理学史选修课，就象清华大学所做的那样，让学生更多地了解科学发展的历程，这对他们的成长将会是有益的。

二、通过物理学史可以阐明理论与实践的关系。物理学是实验科学，实验工作是基础。强调实验的意义，并不是否定理论的重要性，只有在实验的基础上建立了正确的、经得起实践检验的理论，才能由表及里达到对客观事物的规律性认识。如果能在系统地介绍理论发展线索的同时，更多地介绍实验工作的经过和所起的作用，以及理论与实验的相互依赖关系，就更有教育意义。郭奕玲、沈慧君两同志写的这本《物理学史》比较注意这些方面，在这本书里，不但全面探讨了这些关系，还就物理学每一分支的不同特点加以具体阐述。值得提到的是，书中专门设了“实验与实验室”和“单位、单位制与基本常数”两章，这就更丰富了有关实验的内容。

三、科学是全人类共同创造的社会财富。它是科学家集体智慧的结晶，是时代的必然产物。但它的每阶段的具体发展情况又往往要受到各种客观条件的影响。我们不否认科学家个人的伟大作用，但科学绝不是少数几个特别有天才的大科学家在头脑里凭空创造出来的，只有那些善于继承又勇于创新的科学家才有可能抓住机遇，作出突出贡献。机遇也可以说是一种偶然性，但是在偶然性中体现了必然性，物理学史中大量

事例可以说明，各种科学发现往往具有一个共同点，那就是勤奋和创新精神。只有不畏劳苦沿着陡峭山路攀登的人，才有希望达到光辉的顶点。

最后，我还想对青年同学们讲几句话：除了自然科学以外还应该学一点近代史和现代史、辩证唯物主义、历史唯物主义和毛泽东选集第二版。我们能在四十年中在经济建设、文化建设和国防建设上取得重大成绩，提高我国的国际地位，是与在中国共产党领导下发扬独立自主、自力更生、艰苦奋斗、大力协同，建设有中国特色的社会主义道路分不开的。为祖国的四个现代化作出贡献，我们更需要强调集体主义精神。

钱三强

1991.7.25.

前言

物理学史研究人类对自然界各种物理现象的认识史。它研究的是物理学发生和发展的基本规律、物理学概念和思想的发展和变革。它研究物理学是怎样成为一门独立学科，怎样不断开拓新领域，它的各个分支怎样互相渗透，怎样分化，怎样综合，怎样分化出新的学科，又怎样综合产生新的飞跃。

物理学象一座知识的宝塔，基础雄厚，力学、热学、电学、光学以至于相对论、量子力学、核物理和粒子物理学，形成了一座宏伟的大厦。它又象一棵大树，根深叶茂，从基根到树干长出茂密的枝叉，又结出累累果实。可以说，物理学是一门不断发展的科学，它向着物质世界的深度和广度进军，探索物质世界及其运动的规律。

通过物理学史的学习，不但能增长见识，加深对物理学的理解，更重要的是可以从中得到教益，得到启示，开阔眼界，从前人的经验中吸取营养，用以指导我们的工作，使我们少走弯路。

本书是在我们讲物理学史课程时所写讲义的基础上扩充而成的。课程原名物理学史专题讲座，是为清华大学本科生开设的选修课。之所以叫专题讲座，是因为在理工科大学没有那么多时间，也没有必要按步就班地进行系统地讲授。那样既乏味又费时间。如果有兴趣，可以自己找书看。我们认为，如其平铺直叙地罗列一大堆史实，不如抓住若干典型，进行个例剖析，讲得深透些。什么是个例剖析？我们指的是就某一个事件、某一项发现或某一位科学家的成就进行充分的揭示，说明其前因后果、来龙去脉，不仅说有什么，还要说为什么。例如，可以问一问：为什么会出现那样的事件？为什么会发生新的突破？为什么会造就伟大的人物？分析其成功的要素，总结其经验教训，提炼出可供大家共享的精神财富。所以我们选了十几个专题，每讲一个专题，分析一个例子，于是就叫专题讲座。讲座开了几届之后，又感到选修课不宜过专，不能让学生花费过多的精力阅读原始文献，但是有必要保留专题讲座的精华，即从个例剖析应该得到的各种有益的启示，这些启示并不是生硬灌输给学生，而是通过真实的历史、实际的资料、生动的情景把学生引向历史的场面，让他们自己去体会，自己去获取应该得到的启示。于是这门选修课就改名为《物理学史的启示》。总之，我们的宗旨是使学生或读者在对物理学史进行个例剖析的基础上，得到启示，受到鼓舞。

怎样进行个例剖析呢？

简单说来，就是在充分占有资料的前提下，沿着如下的线索进行研究：

■图 0-1 个例剖析示意图

我们用这张图来表示研究的方法。一条线代表时间，一条线代表人物的活动，一条线代表事件的发展经过。我们在全面地考察了人和事的发展经过之后，由远而近，把注意力聚焦在当事人作出发现的关键时刻，分析 6 个 W：

(1)Why？为什么会发生？一个物理事件之所以发生，必定有其历史背景和动因。

(2)What？事件的性质，有何特点？有何意义？在历史上起了什么作用？

(3)When？有什么时代特点？为什么在这个时候出现？有没有历史的必然性？

(4)Where？为什么在这个地方？是什么社会因素决定的？

(5)Who？分析人物的特点，他的成功要素。为什么会作出这个成果？

(6)How？他们是怎样作出成果的，所经的曲折和奋斗历程以及从中可以得到的启示。

我们将力求全面回答这些问题，从而尽可能深入地了解事件的历史背景和当事人取得成功的经验。每个课题都将围绕这 6 个问题(6 个 W)展开。当然，具体提出几个问题应视课题而异。例如，对于热辐射的研究我们可以提出如下几个问题：

(1)为什么量子假说会在热辐射这一领域首先提出？

(2)为什么人们对热辐射那样感兴趣？

(3)为什么量子假说是在德国而不是在别的国家首先提出？

(4)为什么是普朗克而不是别人？

这几个问题正是同学们常常提出的问题，如果能够找到正确答案，当然就会有所收获，从中得到有益的启示。

下面谈谈值得注意的几个关系：

1. 基础科学和应用科学的关系

物理学是基础科学，也是正在发展中的科学。它是许多科学与技术的基础和发源地，也是革新改造某些科学技术的基本依据。所以，我们学习物理学、应用物理学、研究物理学，因为它是长远起作用的科学。从物理学史可以得到有力的启示，例如：电器和电机工业起源于电磁学，它们的革新改造依然离不开电磁理论和量子理论，超导的应用就是一例。

2. 物理学中理论与实验的关系

物理学是以实验为本的科学。物理理论来源于实验，但又高于实验。正确处理理论与实验的关系，是物理学家成功的重要因素。什么叫实验？实验是人类有目的地在变革自然的过程中认识自然的一种手段，是人类发挥高度智慧的一种特殊的实践活动。要变革、要观测、还要用到各种仪器，但更不可缺少的是理论的指导和分析。通过物理学史的学习，可

以充分认识实验在物理学发展中的作用，端正对实验的认识，对以后大家的发展非常重要。前人的经验会给我们有益的启示。

3. 科学与技术的关系

物理学的发展与技术有密切关系。如果没有真空技术、低温技术和电子技术，就不会有现代物理学。许多物理学家从事技术工作值不值得？算不算改行？可以说是改行，但值得。不仅值得，而且必要，因为有这个需要。技术的改造与发展，需要物理学家的合作。我们不要鄙视技术工作，也不要低估物理学的作用。许多工程技术人员重视物理学的学习，甚至参与物理学的研究，因为他们懂得物理学的重要地位，要真正在先进技术中找到突破口，往往要依靠物理学的新成就。激光技术、晶体管技术、超导技术、同位素技术、红外技术、生物工程技术，哪一门不是这样呢？

4. 物理学与数学的关系

数学是物理学家的思维工具，只有通过数学才能最终以精确形式表达自然规律。只有通过数学才能抓住错综复杂的变化过程找到最基本、最普遍的规律。例如：没有对数，开普勒难以建立天文学的重要规律——开普勒三定律；没有微积分，牛顿得不出万有引力定律；没有统计学，无法发展分子运动论；没有黎曼张量，爱因斯坦的广义相对论不能完善。总之，物理学的发展离不开数学，而数学的发展也和物理学密切相关。然而有一点要特别提出的是：物理学不等于数学，物理学的发展也不仅靠数学，数学是一种形式逻辑，光靠逻辑推理，物理学是不能前进的，物理学史的学习会给我们充分的例证。

5. 物理学和其他自然科学的关系

物理学和天文学、化学、地质学、生物学等自然科学，也有密切关系。牛顿力学的直接基础是天文学中的开普勒三定律；原子论起源于化学；近代化学靠的是量子理论。物理学史和科技史告诉人们，物理学和其他自然科学相结合，往往产生出很有生命力的边缘科学，例如：生物物理、激光化学、天体物理、地球物理等等。

6. 物理学与哲学的关系

几百年前，物理学叫自然哲学，被人们看成是哲学的一部分。牛顿的一部经典著作就取名为《自然哲学的数学原理》，这是牛顿三定律和万有引力定律的发源地。物理学史的学习会告诉我们，许多物理学的新发现与哲学思潮有联系。能量守恒与转化定律的发现受康德哲学的影响，反过来又成了辩证唯物主义的重要依据之一。物理学的进展往往给哲学提供新鲜例证，而哲学也常对自然科学指出前进的方向。

还有一点要说明，物理学史是研究物理学的发展规律，不是物理学本身，不能代替物理学的学习。物理发展史除了涉及物理本身的内容，还涉及人和社会各方面的问题，所以物理学史和其他科技史一样，既是

自然科学的组成部分，也是社会科学的组成部分。

第一章 力学基本定律的形成

§ 1.1 历史概述

力学是物理学中发展最早的一个分支，它和人类的生活与生产联系最为密切。早在遥远的古代，人们就在生产劳动中应用了杠杆、螺旋、滑轮、斜面等简单机械，从而促进了静力学的发展。古希腊时代，就已形成比重和重心的概念，出现杠杆原理；阿基米德（Archimedes，约公元前 287—212）的浮力原理提出于公元前二百多年。我国古代的春秋战国时期，以《墨经》为代表作的墨家，总结了大量力学知识，例如：时间与空间的联系、运动的相对性、力的概念、杠杆平衡、斜面的应用以及滚动和惯性等现象的分析，涉及力学的许多部门。虽然这些知识尚属力学科学的萌芽，但在力学发展史中应有一定的地位。

16 世纪以后，由于航海、战争和工业生产的需要，力学的研究得到了真正的发展。钟表工业促进了匀速运动的理论；水磨机械促进了摩擦和齿轮传动的研究；火炮的运用推动了抛射体的研究。天体运行的规律提供了机械运动最纯粹、最精确的数据资料，使得人们有可能排除摩擦和空气阻力的干扰，得到规律性的认识。天文学的发展为力学找到了一个最理想的“实验室”——天体。但是，天文学的发展又和航海事业分不开，只有等到 16、17 世纪，这时资本主义生产方式开始兴起，海外贸易和对外扩张刺激了航海的发展，这才提出对天文作系统观测的迫切要求。第谷·布拉赫（Tycho Brahe，1546—1601）顺应了这一要求，以毕生精力采集了大量观测数据，为开普勒（Johannes Kepler，1571—1630）的研究作了准备。开普勒于 1609 年和 1619 年先后提出了行星运动的三条规律，即开普勒三定律。

与此同时，以伽利略（Galileo Galilei，1564—1642）为代表的物理学家对力学开展了广泛研究，得到了落体定律。伽利略的两部著作：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（1632 年）和《关于力学和运动两种新科学的谈话》（简称《两门新科学》）（1638 年），为力学的发展奠定了思想基础。随后，牛顿（Isaac Newton，1642—1727）把天体的运动规律和地面上的实验研究成果加以综合，进一步得到了力学的基本规律，建立了牛顿运动三定律和万有引力定律。牛顿建立的力学体系经过 D.伯努利（Daniel Bernoulli，1700—1782）、拉格朗日

（J.L.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，取得了广泛的应用并发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支。到了 18 世纪，经典力学已经相当成熟，成了自然科学中的主导和领先学科。

机械运动是最直观、最简单、也最便于观察和最早得到研究的一种运动形式。但是，任何自然界的现象都是错综复杂的，不可避免地会有干扰因素，不可能以完全纯粹的形态自然地展现在人们面前，力学现象也不例外。因此，人们要从生产和生活中遇到的各种力学现象抽象出客观规律，必定要有相当复杂的提炼、简化、复现、抽象等实验和理论研究的过程。和物理学的其它部门相比，力学的研究经历了更为漫长的过程。从希腊时代算起，这个过程几达两千年之久。其所以会如此漫长，一方面是由于人类缺乏经验，弯路在所难免，只有在研究中自觉或不自觉地摸索到了正确的研究方法，才有可能得出正确的科学结论。再就是生产水平低下，没有适当的仪器设备，无从进行系统的实验研究，难以认识和排除各种干扰。例如：摩擦和空气阻力对力学实验来说恐怕是无处不在的干扰因素。如果不加分析，凭直觉进行观察，往往得到错误结论。亚里士多德（Aristotle，公元前 384—322）认为物体运动速度与外力成正比、重物下落比轻物快和后来人们用“冲力”解释物体的持续运动以及用“自然界惧怕真空”解释抽水唧筒的种种似是而非的论点，看起来确与经验没有明显的矛盾，所以长期没有人怀疑。而伽利略和牛顿的功绩，就是把科学思维和实验研究正确地结合到了一起，从而为力学的发展开辟了一条正确的道路。

§ 1.2 伽利略的运动学研究

1638 年，伽利略的《两门新科学》一书的出版，揭开了物理学的序幕。他在这本不朽的著作中整理并公布了三十年前他得到的一些重要发现。1639 年 1 月，这位年迈失明的作者口授了一封给友人的信，提到这本书时讲道^①：“我只不过假设了我要研究的那种运动的定义及其性质，然后加以证实。……我声明我想要探讨的是物体从静止开始，速度随时间均匀增加的这样一种运动的本质。……我证明这样一个物体经过的空间（距离）与时间的平方成正比。……我从假定入手对如此定义的运动进行论证；因此即使结果可能与重物下落的自然运动的情况不符，对我也无关紧要。但是我要说，我很幸运，因为重物运动及其性质，一项项都与我所证明的性质相符。”他的这一席话对后人了解他在运动学研究上作出种种发现也许会很有益处。

1.2.1 伽利略为什么要研究自由落体

西方有句谚语：“对运动无知，也就对大自然无知。”运动是万物的根本特性。在这个问题上，自古以来，出现过种种不同的看法，形成了形形色色的自然观。在 16 世纪以前，亚里士多德的运动理论居统治地

^① S.Drake, Sci. Am. 228(1973—May) p.85

位。他把万物看成是由四种元素——土、水、空气及火组成，四种元素各有其自然位置，任何物体都有返回其自然位置而运动的性质。他把运动分成自然运动和强迫运动：重物下落是自然运动，天上星辰围绕地心作圆周运动，也是自然运动；而要让物体作强迫运动，必需有推动者，即有施力者。力一旦去除，运动即停止。既然重物下落是物体的自然属性，物体越重，趋向自然位置的倾向性也就越大，所以下落速度也越大。于是，从亚里士多德的教义出发，就必然得到物体下落速度与物体重量成正比的结论。

亚里士多德的理论基本上是错误的，但这一理论毕竟是从原始的直接经验引伸而来，有一定的合理成分，在历史上也起过进步作用，再加上被宗教利用，所以直到 16 世纪，仍被人们敬为圣贤之言，不可触犯。

正因为如此，批驳亚里士多德关于落体运动的错误理论，不仅是一个具体的运动学问题，也是涉及自然哲学的基础问题，是从亚里士多德的精神枷锁下解脱的一场思想革命的重要组成部分。伽利略在这场斗争中作出了非常重要的贡献。他认识到通过自由落体的研究打开的缺口，会导致一门广博的新科学出现。请读读他在《两门新科学》中核心的一章，即“第三天的谈话”，开头讲的一段话^①：

“我的目的，是要阐述一门崭新的科学，它研究的却是非常古老的课题。也许，在自然界中最古老的课题莫过于运动了。哲学家们写的关于这方面的书既不少，也不小，但是我从实验发现了某些值得注意的性质，到现在为止还未有人观察或演示过。也做过一些表面的观察，例如观察到下落重物的自然运动是连续加速的，但还从未有人宣布过，这一加速达到什么程度；据我所知，还没有一个人指出，一个从静止下落的物体在相等的时间间隔里，保持按从 1 开始的奇数的比数。……

“我考虑更重要的是，一门广博精深的科学已经启蒙，我在这方面的工作只是它的开始，那些比我更敏锐的人所用的方法和手段将会探索到各个遥远的角落。”

1.2.2 近代科学诞生的前奏

伽利略于 1564 年出生在意大利一个贵族家庭里，从小爱好文艺和科学。他所处的时代正值文艺复兴之后思想大解放的时期，意大利是文艺复兴的发源地，思想非常活跃。其杰出代表达·芬奇（Leonard da Vinci，1452—1519）不仅是艺术家和工程师，还做过许多物理实验，主张在科学工作中多进行实验观察；波兰人哥白尼（Copernicus，1473—1543）主张日心说，公开向亚里士多德的信仰者挑战；英国人弗兰西斯·培根（Francis Bacon，1561—1626）大力宣传实验的重要性，极力反对经院哲学，为伽利略的工作鸣锣开道，可以说，他们是伽利略工作的前驱。

^① Galileo Galilei, Two New Sciences, MacMillan, 1914, p.153.

数学上也有人为新科学的诞生作了准备，13—14 世纪英国牛津大学的梅尔顿（Merton）学院集聚了一批数学家，对运动的描述作过研究，他们提出了平均速度的概念，后来又提出加速度的概念。不过，他们从未用之于落体运动。

亚里士多德关于重物下落速度快的结论与实际经验不符，理所当然会受到科学家的实验检验。就在伽利略所在的比萨（Pisa）也多次记载有落体的研究。例如，伽利略的一位老师，叫包罗（Giro-lamo Borro），是哲学教授，就曾在自己 1575 年发表的书中写道^①：

“我们从窗口以同样的力投两个重量相同的物体，铅块慢于木块。”不过，铅块和木块可能是抛出窗外的。

1544 年，有一位历史学家记述了三个人曾对亚里士多德的落体思想表示怀疑。他们注意到亚里士多德的意见与实际经验不符。但书中没有描述具体的实验。

1576 年意大利帕都亚（Padua）有一位数学家叫莫勒第（G. Moletti），写了一本小册子叫《大炮术》，也是以当时惯用的对话方式进行论述的。其中有一段明确地提到落体运动，请读下面一段对话^①：

“王子：如果从塔顶我们放下两个球，一个是重 20 磅的铅球，另一个是重 1 磅的铅球，大球将比小球快 20 倍。

作者：我认为理由是充分的，如果有人问我，我一定同意这是一条原理。

王子：亲爱的先生，您错了。它们同时到达。我不是只做过一次试验，而是许多次。还有，和铅球体积大致相等的木球，从同一高度释放，也在同一时刻落到地面或土壤上。

作者：如果高贵的大人不告诉我您做过这样的试验，我还会不相信呢！那好，可是怎样拯救亚里士多德呢？

王子：许多人都设法用不同的方法来拯救他，但实际上他没有得到拯救。老实告诉您，我也曾以为自己找到了一个办法来拯救，但再好好思考，又发现还是救不了他。”

由此可见，关于落体问题的讨论在伽利略 1589 年当比萨大学教授之前已经广泛展开了，并且已有人作过实验，得到的结果其实是尽人皆知的生活经验。问题在于，没有人敢于触犯亚里士多德的教义。因为亚里士多德的理论指的是落体的自然运动，即没有媒质作用的自由落体运动，这是一种理想情况，在没有真空泵的 16 世纪谁都没有可能真正做这类实验。

^① T.B.Settle Galileo and Early Experimentation in R.Ariset al(eds.), Springs of Scientific Creativity(Minnesota,1983)p.7.

^① 同上一页注释，p.10.

1.2.3 伽利略的落体实验

关于伽利略的比萨斜塔实验，传说纷纭。有人说，他这个落体实验对亚里士多德的理论是致命一击，由此批驳了亚里士多德的落体速度与重量成正比的说法，得出落体加速度与其重量无关的科学结论；有人说，他用大小相同而重量不等的两个球，得到同时落地的结果；甚至有人说他是用炮弹和枪弹做实验的。有人则过分宣扬伽利略的落体实验，说他是第一个做落体实验的人。

然而，伽利略在《两门新科学》中，并没有提到他在比萨斜塔做过实验。有关这个实验的说法大概来自他晚年的学生维维安尼（Viviani，1622—1703）在《伽利略传》中的一段不准确的回忆。这篇传记是在伽利略死后十几年即 1657 年出版的。其中有这样一段记述^①：

“使所有哲学家极不愉快的是，通过实验和完善的表演与论证，亚里士多德的许多结论被他（指伽利略）证明是错的，这些结论在他之前都被看成是神圣不可冒犯的。其中有一条，就是材料相同，重量不同的物体在同样的媒质中下落，其速率并不像亚里士多德所说的那样，与其重量成正比，而是以相等的速率运动。伽利略在其他教授和全体学生面前从比萨斜塔之顶反复地做了实验来证明这一点。”

这里要说明几点：

1. 维维安尼并没有亲眼看见伽利略做斜塔实验，因为伽利略死时（1642 年），他才 20 岁。他来到伽利略身边时（1639 年），伽利略已经双目失明，只能口授了。所以，维维安尼的记述可能不确实。

2. 伽利略如果真的做了斜塔实验，时间大概是在 1589—1592 年他在比萨大学任教之际，可是，有人找遍当年比萨大学的有关记录，均未发现载有此事。

3. 如果真有此事，也只能算是一个表演，不可能通过这个表演对两千年的传统学术进行判决。

那么，究竟伽利略有没有做过落体实验呢？经查考，在伽利略早年（1591 年）写的《论运动》（De Motu）的小册子中确实记载有这类实验。不过，直到伽利略去世二百年后，即 1842 年，才整理发表，维维安尼并不知道这个小册子。这个实验也不像维维安尼所说的，是要彻底批驳亚里士多德的落体理论，而是为了弥补亚里士多德理论的缺陷。伽利略在这本小册子里用阿基米德的浮力定律来说明在媒质中落体的运动。他写道^①：

“但是他（指亚里士多德）甚至犯了一个更大的错误，他假定物体的速率取决于越重的物体分开媒质的本领越大。因为，正如我们证明了

^① S.Drake, Galileo at work, University of Chicago, 1978, p.19.

^① Galileo Galilei, On Motion and on Mechanics, Univ. of Wisconsin, 1960, p. 48.

的，运动物体的速率并不取决于这一点，而是取决于物体重量与媒质重量差值的大小。”

伽利略当时显然仍然相信，同样大小的物体在空气中下落，较重的比较轻的快，因为他写道：

“……我们得到的普遍结论是：在物体材料不同的情况下，只要它们大小相同，则它们（自然下落）运动的速率之比，与它们的重量之比是相同的。”

他甚至还为实际观测所得结果与上述结论不符进行辩护，他写道：

“如果从塔上落下两个同体积的球，其中之一比另一个重一倍，我们会发现重的到达地面并不比轻的快一倍。其实，在运动开始时，轻物会走在重物的前面，在一段距离内要比重物快。”

这件事引起了现代科学史家的兴趣。究竟伽利略是否真的看到了轻物先于重物下落？1983年，塞特尔(T.B.Settle)和米克利希(R.Miklich)做了两球同时下落的实验^①，用高速摄影机拍照，果然重现了伽利略观察到的现象，不过他们不是用机械释放两球，而是用两手分别握着两个球，并且必须手心向下，同时释放。实验判明，伽利略所得轻物走在重物前面的结论，是由于他握重球的手握得更紧，释放时略为缓慢所致。

这件事说明了，伽利略的思想不是从天上掉下来的，他经历了曲折的摸索过程。开始，他甚至还是亚里士多德的维护者。搞清这位近代科学的创始人的思想发展过程当然是一件有重大意义的课题。科学史家们正在利用各种史料进行研究。

1.2.4 伽利略的斜面实验

在伽利略的落体运动定律的形成过程中，斜面实验起过重要作用。他在《两门新科学》中对这个实验描述得十分具体，写道^②：

“取长约12库比（1库比=45.7厘米）、宽约半库比，厚约三指的木板，在边缘上刻一条一指多宽的槽，槽非常平直，经过打磨，在直槽上贴羊皮纸，尽可能使之平滑，然后让一个非常圆的、硬的光滑黄铜球沿槽滚下，我们将木板的一头抬高一、二库比，使之略呈倾斜，再让铜球滚下，用下述方法记录滚下所需时间。我们不止一次重复这一实验，使两次观测的时间相差不致超过脉搏的十分之一。在完成这一步骤并确证其可靠性之后，就让铜球滚下全程的1/4，并测出下降时间，我们发现它刚好是滚下全程所需时间的一半。接着我们对其他距离进行实验，用滚下全程所用时间同滚下一半距离、三分之二距离、四分之三距离或任何部分距离所用时间进行比较。这样的实验重复了整整一百次，我们往

^① T.B.Settle, Galileo and Early Experimentation in R.Aris et al(eds.), Springs of Scientific Creativity, (Minnesota, 1983)p.7.

^② Galileo Galilei, Two New Sciences, Mac Millan, 1914, p.179—180.

往发现，经过的空间距离恒与所用时间的平方成正比比例。这对于平面（也即铜球下滚的槽）的各种斜度都成立。我们也观测到，对于不同的斜度，下降的时间互相间的关系正如作者预计并证明过的比例一样。

“为了测量时间，我们把一只盛水的大容器置于高处，在容器底部焊上一根口径很细的管子，用小杯子收集每次下降时由细管流出的水，不管是全程还是全程的一部分，都可收集到。然后用极精密的天平称水的重量；这些水重之差和比值就给出时间之差和比值。精确度如此之高，以至于重复许多遍，结果都没有明显的差别。”

这个实验设计是安排得何等巧妙啊！许多年来，人们都确信伽利略就是按他所述的方案做的。在历史博物馆中甚至还陈列着据说是伽利略当年用过的斜槽和铜球。

但是，当人们重复伽利略上述实验时，却发现很难得到如此高的精确度。更不能使斜槽的倾斜度任意提高。有人证明，贴了羊皮纸的木槽，实验误差反而更大了。20 世纪中叶，科学史专家库依雷（Koyré）提出一种见解，认为伽利略的斜面实验和他在书上描述的其它许多实验一样，都是虚构的，伽利略的运动定律源于逻辑推理和理想实验。这个意见对 19 世纪传统的看法无疑是一贴清醒剂。因为长期以来形成了一种认识，把实验的作用过于夸大了，好像什么基本定律，包括伽利略的运动定律都是从数据的积累中总结出来的。这种机械论的观点到了 20 世纪理所当然要受到怀疑论者批评。

然而，伽利略究竟有没有亲自做过斜面实验呢？他为什么会想到用斜面来代替落体？他是怎样做的斜面实验？这个实验在他的研究中起了什么作用？

伽利略没有对自己的工作作过更详细的阐述。但是，他留下了大量手稿和许多著作。人们把他的资料编成了 20 卷文集，这是研究伽利略的宝贵史料。

从 1591 年伽利略的那本没有及时发表的小册子《论运动》中可以看出，伽利略很早就对斜面感兴趣了。他在那里主要研究斜面上物体的平衡问题，但也提过下列问题：①为什么物体在陡的平面上运动得更快？②不同的斜面上，运动之比如何？为了使问题更明确，他画了一张图（如图 1-1）。他问道：为什么沿 AB 下落最快，沿 BD 快于 BE，而慢于 AB？沿 AB 比沿 BD 快多少？他的回答是^①：

“同样的重量用斜面提升比垂直提升可以少用力，这要看垂直提升与倾斜提升的比例。因此，同一重物垂直下落比沿斜面下降具有更大的力，这要看斜面下降的长度与垂直下落的长度成什么样的比例。”

■图 1-1 伽利略研究斜面用图

^① W.L.Wisan, Arch.Hist.Exa. Sci., 13(1974)p.152.

既然力的大小与斜度成一定比例，落体运动的研究就可以用斜面来代替，按一定比例“冲淡”作用的力，“加长”运动的距离，这样可以比落体更有效地研究运动的规律。

人们从伽利略的手稿中找到了一些证据，证明他早年确曾做过斜面实验。其中有一页手稿画着一幅草图，两个小球正沿不同斜度的斜面向下运动，说明伽利略曾思考过斜面实验。另一页手稿（如图 1-2）上记录有如下数据^②：

■图 1-2 伽利略的数据手稿

第三列数字是伽利略根据测量数据计算所得。

经过查核，证明伽利略选取的长度单位是 Puntì，1puntì 大约等于 29/30 毫米，最大的距离为 2104 Puntì，相当于 2 米。进一步研究，发现要能在 2 米长的斜面内取得 8 个相继时间内物体（也许是小球）通过的距离，角度必须限制在 1.5° 至 2° 之间。

从纸张的特点可以判定这页数据大约记于 1604 年。此时看来伽利略还没有确定时间平方关系，因为记录上的第一列数据 1、4、9、16……64 显然是后加上去的。第三列的数据有几个地方涂改，似乎是伽利略在实验之后对数据作了修正。这些判断有助于说明伽利略的时间平方关系并不是直接从实验得到，而是从别的渠道先有了设想，再用实验加以验证的。

伽利略在这个实验里测量时间的办法肯定也与《两门新科学》中他的描述不同，因为靠称量水重无法取相继的时间间隔。他可能是用乐器的节拍报时，因为他擅长琵琶。这个实验不需要知道时间的绝对值，根据节拍把小球挡住就可以了。

1.2.5 伽利略推证落体定律

伽利略是怎样领悟到落体定律中的时间平方关系的呢？还要拉回到伽利略对亚里士多德运动理论的批判。

在《两门新科学》中，伽利略借他的化身萨尔维阿蒂(Salviati)的谈话，批驳物体下落速度与重量成正比的说法^①。

“萨：如果我们取两个自然速率不同的物体，把两者连在一起，快者将被慢者拖慢，慢者将被快者拖快。您同意我的看法吗？”

辛：毫无疑问，您是对的。

萨：但是假如这是真的，并且假如大石头以 8 的速率运动，而小石头以 4 的速率运动，两块石头在一起时，系统将以小于 8 的速率运动，但是两块石头拴在一起变得比原先速率为 8 的石头更大，所以更重的物体反而比更轻的物体运动慢，这个效果与您的设想相反。”

^② S.Drake, Galileo at Work, University of Chicago, 1978, p.87.

^① Galileo Galilei, Two New Sciences, MacMillan, 1914, p.62.

接着，伽利略又否定了亚里士多德把运动分成自然运动和强迫运动的分类方法，而是从运动的基本特征量：速度和加速度出发，把运动分成匀速运动和变速运动。

他选择了最简单的变速运动来表示落体运动，这就是匀加速运动。为什么作这样的选择呢？他解释说^②：

“在自然加速运动的研究中，自然界就象在所有各种不同的过程中一样亲手指引我们，按照她自己的习俗，运用最一般、最简单和最容易的手段……

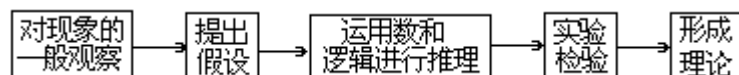
“所以当我观察原先处于静止状态的一块石头从高处下落，并不断获得新的速率增量时，为什么我不应该相信这样的增加是以极其简单的对任何人都很明显的方式进行的呢？”

这一信念促使伽利略按匀加速运动的规律来处理落体运动。

但是在定义匀加速运动时，他似乎走了一段弯路。起初，他也跟别人一样，假设下落过程中物体的速度与下落距离成正比，即 $v \propto s$ 。他又是通过理想实验作出了正确的判断。他假设物体在落下第一段距离后已得到某一速度，于是在落下的距离加倍时，速度也应加倍。果真如此的话，则物体通过两段距离所用的时间将和通过第一段距离所用时间一样。也就是说，通过第二段距离不必花时间，这显然是荒谬的。于是伽利略转而假设物体的速度与时间成正比，即 $v \propto t$ 。这样的假设是否正确，当然也要进行检验。

然而速度是难以直接测量的。于是伽利略借助于几何学的推导，得出 $s \propto t^2$ 的关系，这就是时间平方定律。对于不同的时间比 1 : 2 : 3 : 4 …，物体下落的距离比为 1 : 4 : 9 : 16 …。这些数字正是伽利略在那张实验记录上添加的第一列数字。从第一列数和第三列数的比例关系，伽利略证明沿斜面下降的物体正在作匀加速运动。

从以上论据当然还不足以判定伽利略发现落体定律的全过程，但是已经可以窥视到伽利略研究运动学的方法。他把实验和数学结合在一起，既注重逻辑推理，又依靠实验检验，这样就构成了一套完整的科学研究方法。如果表成程序，伽利略的方法大致如下：



伽利略把实验与逻辑推理和谐地结合在一起，有力地推动了科学的发展。正如他在《两门新科学》第三天谈话结束时说的那样^①：“我们可以说，大门已经向新方法打开，这种将带来大量奇妙成果的新方法，在

^② 同上，p.160.

^① Galileo Galilei, Two New Sciences, MacMillan, 1914, p.243.

未来的年代里定会博得许多人的重视。”

从伽利略研究运动学这一历史片断，我们可以得到什么启示呢？

首先，由于历史资料的深入发掘和研究，我们对近代科学的诞生有了进一步的认识。那种认为伽利略靠落体实验就奠定了运动学基础的说法显然过于简单，不符合历史的本来面目。怀疑论者猜测伽利略没有实际做过他所描述的实验，认为他靠的是推理思辨，这一说法又为新近发现的手稿所驳斥。看来，伽利略创立运动学理论的过程相当复杂，既有思辨，又有实验，他依靠的是思辨和实验的相互印证、相互补充。这种看法，丝毫无损于伽利略这位近代科学先驱的光辉形象，反而使他更能得到后人的理解，让后人认识到他作为古代自然哲学和近代科学之间的过渡人物，为创建近代科学走的是一条多么艰辛的道路。

其次，承认伽利略在研究运动学的过程中思辨（逻辑思维）起重要作用，并不否定实验在物理学发展中的地位。实验的设计和实现总有一定目的，离不开指导思想。从伽利略真正做过的落体实验和斜面实验可以证明这一点。那种鼓吹单纯依靠实验数据的积累就足以获得客观规律，从而奠定科学基础的说法是站不住脚的。强调这一点，并不会否定实验本身，只是否定 19 世纪盛行的机械论观点；也不会抹煞历史上著名实验的作用，而是要提倡对实验的历史作更透彻的研究，分析它们的动因、设计思想、历史背景、内容的复杂性和先驱们的探索精神，以及结论的得出和影响等各个方面，这样做肯定会对实验的意义获得更充分的认识。

我们在这门课程一开头，特意安排这一节比较详细地介绍伽利略的运动学研究，是想让读者了解科学史研究的新进展，认识到科学史（包括物理学史）是一门严谨的科学。只有占有足够充分的、真实可靠的史料才能对历史事件作出恰当的分析，来不得半点虚构和武断。这门科学本身也在成长之中，甚至目前还很年轻，但它可以帮助人们认识科学发展的规律，从历史的回顾探索未来，对科学事业的发展具有一定的指导意义。

§ 1.3 惯性定律的建立

惯性定律是牛顿力学的重要基石之一，从亚里士多德的自然哲学转变到牛顿的经典力学，最深刻的变化就在于建立了惯性定律。前者认为一切物体的运动都是由于其它物体的作用；而后者认为“每一个物体都会继续保持其静止或沿一直线作等速运动的状态，除非有力加于其上，迫使它改变这种状态。”这就是牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中，作为第一条公理提出的基本原理。

1.3.1 古代的认识