

物理史札记

(普物小史)

庄崇光编著

陕西师范大学出版社

写在前面

路，是走出来的。人的生活之路，各不相同。我的生活之路，既坎坷曲折，却又普通平常。艰难的跋涉途中，没有美妙动听的音响，也没有慷慨激昂的乐章。眼病恶魔夺去了我的目光，热情却在心头激荡；把知识还给人民，在人间为科学而开荒。高士其是我效法的楷模，“海迪精神”给我力量。先进人物思想的指引，青年同志的热情帮助，我还想让残烛发光。

在一些青年朋友们的热情帮助下，我撰写了一些旨在宣传物理学史和物理学家业绩的短文，汇总起来，取名《物理史札记》呈献给青年朋友、中学物理教师以及广大业余科学爱好者。如果这些东西，能有助于中学物理教师的教学，有助于激发起青年人对科学的兴趣，有助于开发他们的大脑，我也就欣慰至极了。

最后，在这本尚不十分成熟的小书即将出版之际，让我再一次向那些在我编写此书过程中对我作过多方协助的青年朋友们表示衷心的感谢。同时，我还要以百倍的感激之情，感谢祖国和人民，给我创造了如此优越的条件，使我这残废人，也能为社会做出一些菲薄的贡献。尽管这是微不足道的，但也总算是为社会尽了一点义务。

庄 崇 光

一九八五年

目次

达·芬奇的错误在哪里.....	(1)
伽利略和他的自由落体定律.....	(5)
伽利略是怎样研究抛体运动的.....	(11)
惯性定律是谁首先发现的.....	(15)
牛顿是怎样建立第三定律的.....	(19)
人类是怎样研究天体运动的.....	(22)
笛卡尔的漩涡理论.....	(27)
万有引力定律是怎样建立起来的.....	(30)
惠更斯及其在物理学上的成就.....	(37)
两种运动量及其争论.....	(43)
真空和大气压的发现与早期研究.....	(47)
皇家学会幕后的灵魂——罗伯特·玻意耳.....	(50)
皇家学会的双眼和双手——罗伯特·胡克.....	(53)
• • •	
折射定律是怎样发现的.....	(55)
浅谈人类对“色散”的认识过程.....	(59)
史话干涉与衍射.....	(63)
“偏振”小史.....	(67)
多普勒效应.....	(71)
• • •	
W·吉尔伯特与磁.....	(75)
莱顿瓶的奥秘是怎样揭开的.....	(78)
雷电之谜是怎样被揭开的.....	(79)
库仑定律是怎样建立起来的.....	(82)
“动电”研究的奠基人——伏特.....	(86)
欧姆定律的建立.....	(89)
电学上的牛顿——A·M·安培.....	(92)
电磁感应发现过程中的几个片断.....	(96)
无线电的诞生从赫兹到马可尼.....	(98)

罗兰及其在物理学上的成就.....	(105)
• • •	
道尔顿和他的原子论.....	(107)
卡诺是怎样开始创建热力学的.....	(111)
焦耳和热学.....	(115)
W·汤姆逊对物理学的贡献.....	(119)
• • •	
伦琴和他的X射线.....	(122)
天然放射性的发现与早期探索.....	(125)
电子发现的前前后后.....	(129)
密立根与现代物理.....	(134)
什么是双生子佯谬.....	(140)
从人工放射性的发现到核能释放.....	(142)

达·芬奇的错误在哪里

“文艺复兴时代意大利的著名画家和学者达·芬奇提出了如下的原理。
如果力 F 在时间 t 内使质量是 m 的物体移动一段距离 S ，那么：

- ①相同的力在相同的时间内使质量是一半的物体移动 $2S$ 的距离；
- ②或者相同的力在一半时间内使质量是一半的物体移动相同的距离。
- ③或者相同的力在两倍的时间内使质量是两倍的物体移动相同的距离；
- ④或者一半的力在相同的时间内使质量是一半的物体移动相同的距离；
- ⑤或者一半的力在相同的时间内使质量相同的物体移动一半的距离。

这些原理正确不正确？为什么？”

上述这个冗长的题目，经常出现在物理教材中人们也许会产生疑问。如达·芬奇是一个什么样的人？如果是一个画家，怎么能提出如上所述的那些物理原理？既然提出了原理，又怎么有的不够正确呢？如果不正确，那么正确的作法又是什么呢？达·芬奇的错误又在哪里？等等。搞清这些问题，一定会对动力学的概念更加明确。

一、达·芬奇是怎样一个人？

达·芬奇的全名是列奥纳多·达·芬奇。1452年出生于意大利的芬奇，1516年死于法国。他是一位出类拔萃的人物。在绘画、雕刻、建筑、解剖、工程、物理、哲学等各个方面都显示了惊人的才能。作为一个画家，他为人们留下了世界上的艺术珍品——《最后的晚餐》；作为一个解剖和生理学家，他最先认识到了血液在人体中的流动；作为一个工程师，他曾设计过降落伞、飞机和火炮。恩格斯在《自然辩证法》中曾赞扬他是一位“在思维能力、热情和性格方面，在多才多艺的学识渊博方面的巨人”。

在物理学方面，他继承了阿基米德科学来源于实验的思想，通过大量的实验，对物理学各个领域都作了比较深入的研究。他认为杠杆是最基本的机械，其它机械都是杠杆的变化和复合的结果；他曾作过许多关于摩擦的实验，指出摩擦力与接触面的光滑程度有关；他把阿基米德的液体压力概念加以发展，证明了在连通器中液面有同样高度；他研究过水波和声波，并认为光的反射很象声的反射；他十分了解眼睛成像的道理，知道物体的像是如何呈现在视网膜上的。他完全抛弃了当时流行的见解：人所以能看到物体，是由于眼睛发出光线落到所能看到的物体上的。

对于这样一个在物理学领域里有如此深厚造诣的巨人来说，他又是怎样推得本文一开始所列举的那五条原理呢？

二、达·芬奇是怎样提出这些原理的？

上述诸原理的提出，主要来源于对运动有如下看法：认为力是产生运动（速度）的原

因，只要有力作用，物体就将作匀速直线运动。对于质量一定的物体，外力愈大，速度也愈大，因而在相同的时间内，一定会运动较大的距离。

如达·芬奇说的那样，如力 F 在时间 t 内使质量为 m 的物体移动一些距离 S ，这里的 S 满足下式：

$$S = V \cdot t.$$

正是从这一关系出发，他才推出了前述的五条原理。其具体推证如下：

① F 不变，质量缩小为 $\frac{m}{2}$ ，从而产生的速度“ V ”将是质量未缩小以前的2倍，即 $V' = 2V$ ，且时间相同， $t' = t$ ，所以物体运动的距离 S' 应为：

$$S' = V' \cdot t' = 2Vt = 2S.$$

这就是说移动了 $2S$ 的距离。

② F 不变，质量缩小为 $\frac{m}{2}$ ，从而速度将增加到2倍，即 $V' = 2V$ ，但时间 t' 缩减一半，即 $t' = \frac{t}{2}$ ，于是，移动的距离 S 应为：

$$S' = V' \cdot t' = 2V \cdot \frac{t}{2} = S.$$

这就是说移动的距离相同。

③ F 不变，质量增大到2倍，从而速度将减小为原来的二分之一，即 $V' = \frac{V}{2}$ ，但时间 t' 增加到2倍，即 $t' = 2t$ ，于是，移动的距离 S' 应为：

$$S' = V' \cdot t' = \frac{V}{2} \cdot 2t = S.$$

这就是说移动的距离相同。

④ F 减小一半，如质量不变，速度一定减小一半，今质量减小一半，因而速度应不变，即 $V' = V$ ，且时间相同， $t' = t$ ，于是，移动的距离 S 应为：

$$S' = V' \cdot t' = V \cdot t = S.$$

这就是说移动的距离相同。

⑤ F 减小一半，质量不变，从而速度减小一半，即 $V' = \frac{V}{2}$ ，但时间相同，即 $t' = t$ ，于是，移动的距离 S' 应为：

$$S' = V' \cdot t' = \frac{V}{2} \cdot t = \frac{S}{2}.$$

这就是说移动了原来一半的距离。

三、正确的作法是什么？

判断上述结论是否正确，必须搞清力的概念，即力是维持物体运动（速度）的原因，还是使物体运动状态变化的原因，即产生加速度的原因。正确的看法应该是：力是物体运动状态变化的原因，而不是维持物体运动（速度）的原因。根据牛顿第二定律，如一恒力 F 作用

于质量为 m 的物体上,该物体将同时产生一恒定加速度 a ,此时 $a = \frac{F}{m}$,对匀加速直线运动,物体运动过的距离 S 应满足下式:

$$S = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2.$$

又因 $V_0 = 0$ (物体由静止开始运动) 所以, 上式变为:

$$S = \frac{1}{2} a t^2.$$

下面, 我们就利用上述关系逐一验证达·芬奇所提出的五条原理.

① F 不变, 质量 $m' = \frac{m}{2}$, 所以, 按牛顿第二定律, 加速度 $a' = \frac{F}{m}$ 即 $a' = 2a$, 但时间相同, 即 $t' = t$, 于是

$$S' = \frac{1}{2} a' t'^2 = \frac{1}{2} (2a) t^2 = a t^2 = 2S.$$

这就是说相同的力时间相同使质量是一半的物体移动 $2S$ 的距离.

② F 不变, $m' = \frac{m}{2}$, 所以 $a' = \frac{F}{m} = 2a$ 又因 $t' = \frac{t}{2}$, 于是:

$$S' = \frac{1}{2} a' t'^2 = \frac{1}{2} (2a) \left(\frac{t}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} a t^2 = \frac{S}{2}.$$

可见此时物体移动的距离应是原来距离的二分之一, 这就与达·芬奇的结论不同了.

③ F 不变, $m' = 2m$, 所以 $a' = \frac{F}{m'} = \frac{a}{2}$, 又因 $t' = 2t$, 于是:

$$S' = \frac{1}{2} a' t'^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{2}\right) (2t)^2 = a t^2 = 2S.$$

可见, 此时物体移动的距离应是原来的 2 倍. 这也与达·芬奇的结论不符.

④ 如 $F' = \frac{F}{2}$, $m' = \frac{m}{2}$, 所以 $a' = a$, 又因时间相同, $t' = t$, 于是:

$$S' = \frac{1}{2} a' t'^2 = \frac{1}{2} a t^2 = S.$$

⑤ 如 $F' = \frac{F}{2}$, $m' = m$, 所以 $a' = \frac{F'}{m'} = \frac{a}{2}$, 又因, $t' = t$, 于是:

$$S' = \frac{1}{2} a' t'^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{2}\right) t^2 = \frac{S}{2}.$$

四、达·芬奇的错误在哪里?

以上分析已明确看出，达·芬奇的主要错误就在于把力看成是产生运动（速度）的原因。事实上，物体受力后将作加速运动。从移动的距离 S 与时间 t 的关系看，前者 $S=V \cdot t$ 和时间 t 是一次方关系。显然，当时间 t 不变时，正确的结论与达·芬奇的结论恰好巧合，〔例如①、④、⑤〕，但当 $t' \neq t$ 时，达·芬奇的结论便与正确结论相矛盾。

虽然达·芬奇在这一问题上出了差错，但他终究是一位伟大的人物。因为当时人们一直是从直观感觉出发来研究物体运动的，因而使达·芬奇跟当时其他一些学者一样，也不可能抓住物体运动的实质。一直到比他晚了一百多年以后的伽利略在研究自由落体运动时才引进了加速度的概念，使得人们对运动这一古老的问题有了正确的认识，也为牛顿创立运动定律奠定了基础。

伽利略和他的自由落体定律

众所周知：“自由落体运动是初速度为零的匀加速直线运动”，因而，作为匀变速运动的一个特例，很容易找到位移、加速度和时间的关系：

$$S = \frac{1}{2}gt^2;$$

这就是著名的伽利略自由落体定律。但是，这一定律是怎样提出来的呢？诚然，通过闪光实验可以证明它的正确性，但这是现代人的实验手段。至于伽利略能提出这一定律则是有其历史渊源的。下面我们就对这一定律的产生过程作以简要的叙述。

一、亚里士多德及其对重物下落的认识

这里我们要追溯到伽利略之前人们对重物下落的认识。但是，一翻开历史，就会发现当时的物理学被牢牢地捆绑在古希腊哲学大师——亚里士多德的理论支柱上。

亚里士多德（公元前384—322年）生于古希腊的斯塔基拉城。他的父亲是亚里山大大帝祖父的御医。亚里士多德从小就受过良好的家庭教育，十七岁被送到雅典，跟大哲学家柏拉图学习，这就使他成了一位有名的博学之士。他不仅在哲学，而且在教育学、逻辑学以及物理学等方面都有很高的造诣。

但是，亚里士多德的物理理论有着严重的局限性，因为在这个领域里，他没有做过任何实验，而只是把平时观察到的自然现象用推理的方法作以解释。例如，把一段木材放在火上燃烧，他观察到木材上渗出水、冒出烟并着起火，最后化为灰烬。因此，他推论宇宙间共有四种元素。其中火、水、土（灰）、气（烟）四种元素可按一定的比例组成地面上的一切物质。且它们又有一定的位置：由上而下，按火、气、水、土的顺序依次排列。地面上的土，主要是由土元素构成。而水主要由水元素构成，因水在土之上，所以，地面上的水在土上流动。若由这四种元素组成的物质位置发生了变化，这些物质就要企图重新回到原来的位置，这就出现了运动。至于第五种元素，乃是组成天体的元素。

依照亚里士多德的这种看法，一个重物向地心下落，正是这种自然运动的一个实例。对于两个轻重不同的物体，较重的物体当然要比较轻的物体所含的“土”元素多。所以，它下落的速率显然要比轻的物体下落的速率大，这是和我们平时观察到的一块石头比一片叶子下落得快相一致的。亚里士多德认为：任何物体在下落时，只要一松手，都将很快达到某个下落最后速率，以后就以这个速率下落到终点。是什么因素来决定一个物体的最后速率呢？他认为重量是决定落体快慢的因素。

同一物体在水中下落要比在空气中下落得慢一些，因此，他认为媒质的阻力也是影响速率的一个因素。这样，他又得出结论说：落体的速率随物体的重量而增加，随媒质的阻力而减小，在任何情况下，物体下落的实际速率可以由它的重量和阻力之比求出。这就是说，在

阻力一定时，物体愈重，下落得愈快。

二、史特芬等人对亚里士多德重物下落理论的怀疑

亚里士多德建立的理论，能对某些学科领域内的某些问题作出成功的解释，且他的理论和人们日常所观察到的一些现象基本吻合，使得当时的人们把它作为检验一切知识的唯一标准。从公元十三世纪起，亚里士多德的理论就被吸收到基督教的学者以及神学家的著作里。从此以后，他的思想成了概括一切现象的百科全书，谁要碰一碰它，都会招来嘲笑甚至惩罚。

但是，人们愈来愈发现亚里士多德的好多物理理论与实际不相符合。早在公元五世纪，有个叫约翰·菲罗浦洛斯的学者争论说：物体自然运动的速率应该是重量减去媒质的阻力，而不是被阻力除。菲罗浦罗斯宣称他的实验支持他的理论，但他并没有说明自己的实验细节，只是简单地说：他取了两个重物，其中一个比另一个重一倍，将这两个物体同时放开，观察到重物落到地面所用的时间并不是轻物所用时间的一半。

后来，又有一个名叫卡尔达诺（1501—1576）的意大利数学家，用实验证实了这样一个事实：用同种材料做成的大小不同的东西，不管它们的轻重如何，都可以同样的速度下落。卡尔达诺把他的实验放在不同的媒质（如空气、水、油中）进行比较，都获得了相同的结果。但是，卡尔达诺是一个亚里士多德主义者，他企图把所得的结果归结到亚里士多德理论里面去。他指出，亚里士多德是对的，只是人们把他的理论理解错了。事实上，亚里士多德要说的是“物体愈重，它愈能排开空气和水而前进。”后来，卡尔达诺又用阿基米德的浮力原理，对自己的实验进行了数学证明。这个证明看起来似乎有一定道理，但是，立足点却站错了。因而，根本不能揭示重物下落运动的实质。

最能说明问题的还算是荷兰力学家西蒙·史特芬（1548—1620）在1587年所做的重物下落实验。

史特芬1548年诞生于荷兰。虽然他曾从事过会计员和军事工程师的工作，但却通过自学进入了卢迈大学。在1586年他曾写过一部论力学的著作。内容包括有几项重要的研究成果。他是力的平行四边形法则的首创者。

他的实验是这样做的：把两个重量不同的铅球从二楼窗户里同时松手让它们向地面落去，结果发现这两个铅球同时着地。他说：“反对亚里士多德的实验是这样的：让我们拿两只铅球，其中一只比另一只重十倍。把它们从三十呎的高度同时丢下去，落在—块木板或者什么可以发出清晰响声的东西上面，那么，我们会看到轻铅球并不需要比重铅球十倍的时间，而是同时落到木板上。因此，它们发出的声音听上去就象一个声音一样。”这样史特芬的实验就彻底地动摇了亚里士多德的重物下落理论。

三、伽利略简介

史特芬既然已经动摇了根深蒂固的亚里士多德的重物下落理论，这就使得与他同时代的伽利略有可能从实验方面和数学推理方面全部完成自由落体定律。但伽利略在科学上的地位及其伟大贡献远不只是一个自由落体定律。为此，先让我们对他的一生作以简要介绍。

伽利略于1564年2月15日生于意大利的比萨城，从童年起，就显示出了自己的实验才能。常亲自动手制作一些小机械、小机器。如水磨、船舶等。1581年，十七岁的伽利略依从父命进入比萨大学攻读医学。

1582年的一天，伽利略在比萨教堂祈祷时，发现教堂里悬挂的吊灯被风吹得来回摇动，并有一定的周期。于是，他马上回去动手做关于摆的实验，得出了摆的定律。就是在此定律的基础上，伽利略创造了一种测脉搏器。不久以后，伽利略会见了一个叫阿司提略的数学家，于是，他的学习兴趣转变了，开始研究几何，在极短的时间内，他吸收了欧几里得和阿基米德的学说，并怀疑大哲学家亚里士多德的理论。中途改行，使这个头脑发达的学生在医学上的成绩不断下降。21岁毕业那年，他没有在比萨大学获得任何学位。

但是，他对数学和物理的钻研，却是硕果累累。1586年，他开始撰写论文，不久又发明了“浮力天平”，这是现代天平的前身；1588年他的一篇题为“物体重心”的论文轰动了整个学术界，引起了当时学者们的注意。因此，1589年，他被比萨大学聘为讲师。

如上所述，早在学生时代，他就对亚里士多德的物理理论发生了怀疑。在比萨讲学期间，他把自己的怀疑公开了，并和那些老年同事争论。这使他在比萨的处境恶化起来，一些人一有机会，就对他热讽冷刺。这不得不使他背井离乡。1592年，他转到了佛罗伦萨的帕多瓦大学任教。那是他科学活动的极盛时期。在这时期，他不仅在力学，而且在天文学、光学等领域内都作出了重大的贡献。

1609年，住在荷兰米得堡的汉斯·利珀希发现：把两个透镜放在一起，可以使远处的物体看起来近一些。伽利略听到这个消息，立即根据光的折射知识制成了能放大三十倍的望远镜。通过望远镜观察到木星有四个卫星。这就动摇了托勒密的“宇宙只有一个中心”的地心说。从而受到罗马宗教法庭的传讯。但这并没有使伽利略屈服。从1624年起，他开始写《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》一书，于1632年出版。在这本书中，伽利略以非凡的文学才能，极其鲜明生动的语言，宣传哥白尼学说，并以大量观测事实为依据，说明了行星运动规律。因此，新的灾难又降临了，罗马教皇这一次对他进行了严厉的提审。从1633年起，这位年已六十七岁高龄的老人，被终身囚禁在佛罗伦萨附近的一所村舍里，过着独身生活，渡过了一生最后的九年。也正是在这九年里，他完成了著名的《两种新科学的对话》一书，其中论述了诸如流体力学、自由落体、内聚力、运动、加速度、相对性原理等方面的定律。奠定了经典力学的基础。正如爱因斯坦所说的那样：“伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。”

那么，他又是怎样对亚里士多德重物下落理论提出质疑的呢？这就是我们下面所要论述的问题。

四、伽利略对亚里士多德重物下落理论的质疑

我们知道：伽利略早在学生时代就对亚里士多德的物理理论产生过怀疑。这种怀疑，首先表现在对重物下落的理论上。在比萨任教期间，他曾写过一篇和卡尔达诺重物下落理论近似的论文，因为觉得理由不够充分，故一直没有公开发表。当他清楚地知道史特芬的重物下落实验后，这种怀疑就更坚定了。从1633年当被囚禁在佛罗伦萨的时候，他的怀疑就明确地提出来了。

他认定亚里士多德关于重物下落的理论，缺乏事实根据，存在着逻辑上的混乱。其主要表现为：

1. 按照亚里士多德的理论，重物下落的速度 $V = \frac{\text{重量}}{\text{阻力}}$ ，即重物下落的速度与重量成正

比。那么，根据这一说法：以同一高度（如100库比特）同时丢下两个重量分别是100磅和1磅的铁球。既然前者的重量是后者重量的100倍，那么前者的速率也是后者速率的100倍。即前者已经落地，后者下降还不到1库比特。但事实并非如此，正如伽利略所说的那样，两球几乎是同时落地的。对于这一点，伽利略在他的《两种新科学的对话》中写到：“亚里士多德说：‘一个100磅的铁球从100库比特高度落到地面时，1磅的铁球只下落了1库比特，而我说它们是同时落地的。’”

2. 如果一个重物和一个轻物从同一高度下落的时间分别是 t_1 和 t_2 ，根据亚里士多德的观点，必有 $t_1 < t_2$ 。如果把重物和轻物捆在一起从同一高度处下落，那么，它下落的时间 t 究竟应该比 t_1 大呢？还是小呢？可以有两种答案：

答案①：重物轻物捆在一起，重物可带动轻物落得快一些。但也不可能轻物又连累重物落得慢一些。所以，合成速度必然是二者单独落下的一个中间数。时间也就在二者之间：即 $t_1 < t < t_2$ 。

答案②：因为捆在一起的两个物体总的质量增大了，所以它会下落得更快。时间也就更短。即： $t < t_1$ ， $t < t_2$ 。

伽利略认为：如果出发点是正确的，推理应该一致。既然以上两个答案都同出自于亚里士多德的“物体愈重，落得愈快”这个观点。但却得出矛盾着的两个结果。如果承认我们的推理是严密的，那么就只能认定亚里士多德的出发点是错误的了。

五、伽利略是怎样建立自由落体定律的？

前已述及伽利略在比萨任教时曾写过关于重物下落（自由落体）的论文，但在这篇论文中，他把出发点放到了重物下落是匀速直线运动的这个观点上，因而，得出了令人困惑的结论。看来重物下落的速率并不是匀速的。那么这到底是一种什么样的运动呢？这个问题直至他转到帕多瓦大学以后才得到解决。

帕多瓦大学是当时一所有名的大学。这里云集着德、法、荷、英等各国的留学生，学术空气当然要比比萨自由和浓厚得多。在这里，伽利略接触到了荷兰著名学者史特芬的著作。和史特芬一样，他也从抛射体问题入手，重新开始了他的重物下落理论的探讨。

他曾研究过这样一个实验：当一个球匀速滚过桌面，再以桌面沿一条曲线落到地板上时，他发现在这条轨道上的任何一点，球具有两种速度。一种沿水平方向，速度恒定不变；另一种在垂直方向上。它正恰如同一物体从同一高度竖直落下来一样。这是一种什么样的速度呢？伽利略仔细观察自己所做的实验，结果发现：这是一种速度在不断变化，而且是越变越大的速度。伽利略称它为自由落体的连续加速。为了描述这种连续的加速，他引入了加速度这个概念，如果我们用 a 来表示加速度，那么，它在数值上就等于速度的变化和完成这种变化所用的时间之比。即

$$a = \frac{V - V_0}{t - t_0} \quad (1)$$

且伽利略认定自由落体是一种匀加速运动。

为了证明他这种“看法”的正确性，伽利略想借助实验对(1)式进行验证。但是，根据当时的技术水平，要测定一个下落物体的速度是无法实现的。于是，伽利略确定利用数学手段，企图把上式变换成只含有下落距离和时间的形式，以便于测量证明。

既然自由落体是匀加速运动，下落的距离 S 就应是：

$$S = \bar{V} (t - t_0) \quad (2)$$

这里 $\bar{V}$ 表示平均速度，对于在 t 、 t_0 间的平均速度：

$$\bar{V} = \frac{V_0 + V}{2}; \quad (3)$$

式中 V_0 为初速度， V 为末速度。因为是自由落体，故 $V_0 = 0$ ，且规定 $t_0 = 0$ ，

那么，对于(1)式：
$$a = \frac{V}{t} \quad (4)$$

对于(2)式：
$$S = \bar{V} \cdot t \quad (5)$$

对于(3)式：
$$\bar{V} = \frac{1}{2} V \quad (6)$$

把(4)、(6)式都代入(5)式，就有：

$$S = \frac{1}{2} at^2$$

这就是自由落体公式，后来经过惠更斯(1629—1695)的研究，证明此处的 a 应是重力加速度 g ，故上式就是：

$$S = \frac{1}{2} gt^2.$$

值得指出的是这里的推导过程，没有完全按照伽利略最原始的作法去做。而是根据他的基本思想概括的。通过这一推导，可以看出伽利略的基本思想和基本做法是：认定自由落体运动是匀加速运动，引入加速度的概念。从而得出了自由落体位移与时间 t 的平方成正比的结论。

怎样通过实验去证明他的说法是正确的呢？能不能直接把两个轻重不同的物体以同一高度处丢下进行验证呢？不能。因为，下落时间很短促，根据当时的科学水平是很难精确测定的。

过去一些教材和广泛流行的一些科普著作中都曾描述过伽利略在比萨斜塔作实验的传说，近年来国内外的许多学者对此提出了质疑，普遍认为：伽利略根本没有作过斜塔实验。但是，他确实作过验证他的自由落体定律的实验。由于自由下落的速度很快，每点的速度无法测量，伽利略为了“冲淡引力”，设计了斜面的方法。其做法如下：

取一长为7米多的木板，上刻直槽，沿槽贴上羊皮纸以减少摩擦。板的一端比另一端高60厘米，使板的倾角不足5度。他的测时装置是一种所谓“水钟”。这是一个充满了水并放在高处的容器，下开小孔，插以细管，让由细管滴出的水收集在一玻璃杯中，最后用天平称水的重量，即可知时间的长短。伽利略让一坚硬光滑的小球沿槽滚下，并测量小球沿斜面滚下的距离和它相应的时间。他发现，在连续的几个时间间隔内，球滚下槽长的距离与1、3、5、7……等奇数成正比。故在各连续时间内球滚下之总距离与1、1+3、1+3+5……等成正比，即与 1^2 、 2^2 、 3^2 ……等成正比。伽利略用不同重量的球，在不同的倾斜度下做实验。并且重复了几百次，都得到同样的结果。即小球所通过的路程与它所经历的时间的平方成正比。当倾角较大时，时间就很难测定了。于是，他采用外推法，以至直到倾角为 90° 的情

况，都得到了同样的结论。从而完全证实了自由落体定律。

$$S = \frac{1}{2}gt^2.$$

自由落体公式的建立，是伽利略一生中最显著的成果之一，它宣告了新物理学的诞生，显示了由质疑、假说、演绎、实验到结论这一套完整的新的科学研究方法。

伽利略自由落体公式的建立，为正确研究运动规律奠定了重要的基础。正是在这一理论的基础上，人们才有可能深入地研究抛体运动。这个定律不仅可以描述宏观物体的运动，就是研究带电粒子在相互垂直的两个外加电场作用下发生偏转时也要用到它。

特别值得强调的是，牛顿第二定律的建立，也是由于受到伽利略自由落体公式的影响，伽利略看出了加速运动是由于受外力作用的影响，而牛顿则进一步通过质量把外力与加速度联系到一起了。

伽利略是怎样研究抛体运动的

1632年出版的伽利略的名著《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》是一部旨在宣传哥白尼的日心说，批驳以亚里士多德、托勒密为代表的地心说的科学巨著。书中涉及到许多力学问题，其中以“第二天”的述叙最为突出，在“第二天”中，为了批判地球不动的谬论，证明地球在绕轴自旋，为此伽利略广泛地运用了他在力学领域里的研究成果，如落体运动、抛体运动、摆的振动、惯性运动以及运动的合成和相对性原理等。

本文主要介绍伽利略对抛体运动的分析和研究，但对这一问题的研究并非由伽利略开始，在伽利略以前就有许多科学家进行过探讨。

在欧洲中世纪时代，由于火器的发展，搞清抛射体运动的力学性质已成为迫在眉睫的重要问题了。古希腊人过去只能说明处在同一直线上的不同的力或者不同运动的合并，如杠杆的平衡力或者运动。抛射体的运动一直是一个没有解决的问题，因为当时人们认为这类运动是射力和引力共同作用的结果，而这两种力又很少是直线的或平行的，中世纪的亚里士多德学派认为，抛射体先是沿一根倾斜的直线上升直到射力耗尽为止。然后在引力作用下垂直下落，所以他们并不把射力和引力合并起来，而是认为这两种力一先一后。另一些学者，根据炮弹射出轨道的最高点并不形成一个尖角，而是带有一定圆形这一事实出发，则认为引力有可能在抛射体的冲力未耗尽之前就开始起少许作用。文艺复兴时代的著名学者列奥纳多·达·芬奇采用了这种见解，他觉得一个抛射体的射出轨道有三部分：一、在冲力作用下的直线运动；二、在引力和冲力混合作用下的一种曲线运动；三、在引力作用下的铅直坠落。继列奥纳多·达·芬奇之后，达塔格里亚于1546年出版了一本《论兵法、火药和射击学》的书，在书中明确指出抛射体的冲力和引力在抛射体的轨道从头到尾都是曲线。原因是总有某些部分的引力在把射弹拉离它的运动路线。达塔格里亚还发现一条把大炮射程和倾斜角度联系起来的经验法则。达塔格里亚说，炮身的倾角在四十五度时射程最远，而且随着倾角的增大或减小，射程就会缩短，开头较慢，后来就缩得非常之快。伽利略继承了达塔格里亚的观点，从理论和实验方面分析了抛体运动形成的原因、运动的轨道、飞行的时间和射程等问题，同时还对亚里士多德学派的一些错误论点进行了批判，具体内容可概括如下。

一、抛体运动中的受力问题

物体一旦抛出，是否还受力作用呢？按亚里士多德的观点，“只要是运动的物体，一定受到一个持续作用力。抛射体的运动不是由于加上去的力，而是由于介质的带动”。这一论点流传甚广，影响极深，到中世纪仍有人认为，抛射体是由介质带动的，而这介质就是空气。他们还说：“运动的原因必须归之于介质，不仅对抛射体来说是如此，而且对所有其它不是天然的运动来说都是如此。”抛者把石子握在手中，迅速而有力地挥动手臂抛出去，这

就不仅使石子，而且使周围的空气都开始运动，所以石子一脱手就处于被冲力推动的空气之中，并被空气带动，如果空气不起作用，石子就会从抛者手中落到他的脚旁。总之，按这种观点，被抛出的物体总是靠空气的推力而使之运动的。伽利略充分认识到上述观点的错误性。他说：由于抛者所给予的力而保持运动，介质对抛射体的继续运动不起作用。为此他采用了巧妙的方法批驳了亚里士多德学派的观点。他以轻重两个不同物体被风刮走的距离与用力抛出的距离截然不同的事实为例说，按照亚里士多德的观点，放在桌子上的两个物体，一个轻物与另一个重物，被大风吹离桌面时，轻物飞出远，重物飞出近，这是由于介质的作用。但当抛出两个物体时，重物飞出远，轻物飞出近，这又怎样解释呢？显然这正否定了介质的作用。伽利略为了说明这个问题，又以射箭为例进一步指出，如果用同一只弓射出两支箭，一支照惯常方式射，而另一支横射，即就是把箭身横过来沿着弓弦发射出来，那么横射的箭连照常规射出的另一支箭的射程的二十分之一都不到。因为就经验而论，如果我们在桌子上放着两支箭，当一股强风吹过来时，一支顺风向，另一支横着风向，风会很快带走后者而留下前者，假如亚里士多德的学说正确，那末弓射出的两支箭也该产生同样的结果，因为横射的箭会被弓弦推动的与箭的全长相应的大量空气带走，而另一支箭只是从箭粗细相应的一小圈空气获得冲力，但人们知道按常规射出的箭远比将箭横射时射程要远得多得多。不然的话人们为什么不将箭横射呢？通过上述两个例子说明，“介质给予抛射体以运动是错误的，而介质阻碍了它的运动则是正确的。”这也正是我们现在物理学中通常将采用的观点。

除了上述两个形象的例证之外，伽利略还否定了亚里士多德学派所坚持的一种观点，在他们看来，“在进行抛射运动时，抛射者的一挥，就可以使空气中产生持续的冲力。”事实果真是如此吗？伽利略认为“这是不可能的，因为当手臂一停，手臂周围的空气也立即停止。”为了说明这一论点，伽利略又从生活实际出发给我们举了一些生动而又有趣的例子，他说：“让我们走进那间房间，挥起毛巾尽可能地扇动空气，随后放下毛巾立即把一支点燃的小腊烛拿进房间或者使一小片极薄的金叶在房间内飘扬，你将从其中任何一件东西的平静飘动中看出，空气已立即恢复平静。”因为我们再也没有观察到腊烛被熄灭或薄片叶飘动的现象。综上所述，不难得出这样的结论：①介质的运动不会对抛体运动产生动力作用，而只能起阻力作用。②运动一旦停止，作为产生冲力的介质的运动也就不复存在。这就从根本上否定了介质能对抛体运动起冲力作用的陈腐而错误的观点。

二、抛射运动是一种合成运动

抛射运动是一种合成运动，在中学物理中也往往是以运动合成的例子出现的，这已是大家所熟悉的事实了。但在伽利略以前，要想确立这一认识，确实是十分困难的。因为亚里士多德学派，根本否定同一物体能参与两种或两种以上的运动这一客观事实，他主观地从感觉出发，以高塔上的物体或桅杆上的物体必垂直落于塔底或杆底，以及“向上抛出或射出的物体沿着原路线垂直地回到它们被抛出或射出的同一地点”为例，不仅维护了地心说，反对了地动说，而且强调了运动的单一性。

与此相反，伽利略从相对运动的观点出发，认定从塔顶落下石头的运动应当由两部分组成，即有从塔顶降落到塔底的运动，同时又应当有跟着这个塔一起的运动。“由此可见，石头所描出的轨迹不再会是那条简单垂直线，而是一条横线，也许它不直了”。当然这种不直

的现象是站在地球上的观察者所观察不到的。因为我们预先假定圆周运动是自然赋予整个地球的，而石头、塔和人都是它的一部分，对此伽利略曾明确指出：“如果地球是不动的，则石子是脱离静止状态而垂直下坠；但如果地球是运动的，由于石子也以与地球相等的速度在运动，它不是脱离静止状态，而是脱离与地球的运动相等的运动状态。它把这一运动与附加的向下运动混合起来，结果形成一种斜线运动。”

通过上述分析，不难看出伽利略已经说明了石头参与两种运动（即向地球表面的运动和随地球一起的运动）的客观事实。为了进一步论证抛物体确实参与两种运动，他从运动时间入手，深刻而正确的指出：“在同一高度物体竖直下落的时间与同一点任意平抛物体所用的时间是等同的。”那么是否真的如此呢？他又以桅杆上的石子下落为例做了详细的说明，他说，“假定船停着不动，石子从桅顶落下需要脉搏跳动二次的时间，然后使船运动，使同一石子从同一地方落下，石子落到甲板上，仍然需要脉搏跳动二次的时间，在这段时间里比如说船航行了二十码，石子的实际运动是一条斜线，比第一条只有桅杆那么长的线要长得多，然而，石子通过两段线所需要的时间则是相等的。至于在塔顶上平射的大炮，如以不同的冲力射出炮弹，可以肯定其射程一定不等。那么，这些炮弹在空中飞行所需的时间是否相同呢？伽利略的回答是肯定的，他说：“如除去空气阻力，我认为，当一颗炮弹从大炮中射出，同时让另一颗炮弹从同一高度垂直落下，这两颗炮弹肯定会在同一瞬间到达地面。由这一分析我们可以深刻的体会到伽利略分析问题的巧妙性和逻辑思维的准确性。他没有使用任何运动迭加的公式，而是通过合成运动所经历的时间与某一分运动所经历的时间是等同的这一客观事实就说明了合成运动的存在，而且这种等同性又是从他切身实践所获得的，我们认为讲清这种分析问题的方法和考虑问题的思路，对提高同学的思维能力，帮助同学学好物理学将是一个有益的启示。

三、对抛体运动的进一步研究

《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》一书的出版，引起了宗教法庭的不安和恐惧，于是给伽利略加上种种罪名，使他受到宗教法庭的严酷审讯。虽然，此时的伽利略已是年过七旬的老人，双目几乎失明，但他仍继续坚持真理，钻研科学，在他去世前的九年中又以力学为研究对象，于1638年出版了《两种新科学对话》一书。该书对他以及他以前人们对力学的研究进行了实验和理论的总结，其中“第四天”是研究抛射运动的。

伽利略从惯性原理和由他自己总结的自由落体公式出发，使用迭加原理，即运动合成原理；并借助于实验全面而系统地研究了抛体运动。他分析了一个小球以匀速滚过桌面，再从桌边沿一根曲线轨道落到地板上的运动过程指出在这条坠落轨道上的任何一点，球都具有两种速度。一个是沿平面的速度，根据惯性原理始终保持匀速，另一个是垂直的速度，受引力的影响而随着时间的加快，方向与地面垂直，球下落的距离与时间的平方成正比。这样的关系决定了球所走轨迹应是一条半抛物线，一个从大炮发出的抛射体，其轨迹则应是一条全抛物线，当炮身的角度抬高到 45° 时，射程就最远。这样以来，上述达塔格里亚从观察中所发现的仰角为 45° 时射程最远的事实，就由伽利略通过实验加以验证并由理论推算出来了。同时他还给出了当两个抛射角互余时，其射程相等的著名结论。所有这些推导都已被现行教材所采用，这里就不重述了。