

4

自由落体运动

问题

?

站在高层建筑物上，让轻重不同的两个物体从同一高度同时落下，你认为哪个物体下落得快？

在教室内拿两张同样大小的纸，将其中一张揉成一个团。让纸团和另一张纸在同样的高度落下，看看哪一个下落得快？

结合实验及生活中的经验，讨论：什么因素影响物体下落的快慢？



物体下落的运动是司空见惯的，但人类对它的认识却经历了差不多两千年的时间。最早研究这个问题的，大概要算古希腊学者亚里士多德了。

平常人们观察到的事实是，一块石头比一片树叶落得快些……亚里士多德认为物体下落的快慢跟它的轻重有关，重的物体下落得快。他的这一论断符合人们的常识，以至于其后两千年的时间里，大家都奉为经典。

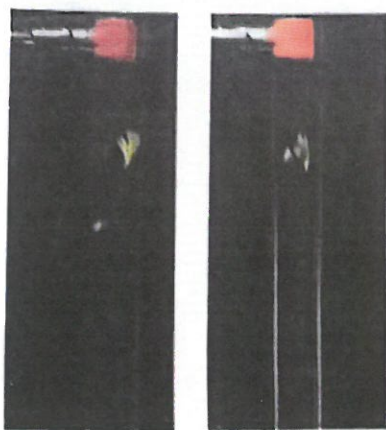
自由落体运动

伽利略认为，根据亚里士多德“重的物体下落得快”的论断，会推出相互矛盾的结论。例如，假定一块大石头的下落速度为8，一块小石头的下落速度为4，当把两块石头捆在一起时，大石头会被小石头拖着而变慢，整个物体的下落速度应该小于8；但是，把两块石头捆在一起后，整个物体比大石头要重，因此整个物体下落的速度应该比8还要大。这种相互矛盾的结论，说明亚里士多德“重的物体下落得快”的看法是错误的。根据仔细的分析，伽利略认为物体下落的运动只有一种可能性：重的物体与轻的物体应该下落得同样快。

► 伽利略通过逻辑推理，首先指出亚里士多德对落体认识的问题，然后得出重物与轻物应该下落得同样快的结论，最后用实验证实了自己的结论。伽利略这种推理与实验相结合的方法，为物理学研究奠定了基础。研究中所体现的批判精神是创新所必需的。

那么，轻重不同的物体下落的情况到底怎样？下面我们一起来做个比较精细的实验，仔细研究一下。

演示



甲 有空气 乙 真空

图2.4-1 玻璃管内的羽毛、铁片的下落

轻重不同的物体下落快慢的研究

如图2.4-1甲，一个两端封闭的玻璃管（也称牛顿管），其中一端有一个开关，玻璃管可以与外界相通。把质量不相同的铁片和羽毛放到玻璃管中，玻璃管竖直放置，让铁片和羽毛从玻璃管上方同时开始下落，观察物体下落的情况。

如图2.4-1乙，把玻璃管里的空气抽出去，再次观察物体下落的情况。

由实验可以看到，将玻璃管里的空气抽出去后，没有了空气阻力的影响，轻的物体和重的物体下落得同样快。在现实生活中人们之所以看到物体下落的快慢不同，是因为空气阻力的影响。如果没有空气阻力，所有物体下落的快慢都一样。

物体只在重力作用下从静止开始下落的运动，叫作**自由落体运动**（free-fall motion）。这种运动只在真空中才能发生。在有空气的空间，如果空气阻力的作用比较小，可以忽略，物体的下落可以近似看作自由落体运动。

由上面的实验我们可以看到，自由落体运动是加速运动。那么，它的加速度在下落过程中是否变化呢？

实验

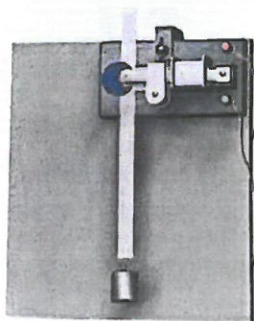


图2.4-2 自由落体运动的实验装置

研究自由落体运动的规律

如图2.4-2，固定打点计时器，纸带一端系着重物，另一端穿过计时器。用手捏住纸带上端，启动打点计时器，松手后重物自由下落，计时器在纸带上留下一串小点。

仿照前面对小车运动的研究，测量重物下落的加速度。改变重物的质量，重复上面的实验。

自由落体加速度

对不同物体进行的实验结果表明，在同一地点，一切物体自由下落的加速度都相同，这个加速度叫作自由落体加速度 (free-fall acceleration)，也叫作重力加速度 (gravitational acceleration)，通常用 g 表示。

重力加速度的方向竖直向下，它的大小可以通过多种方法用实验测定。

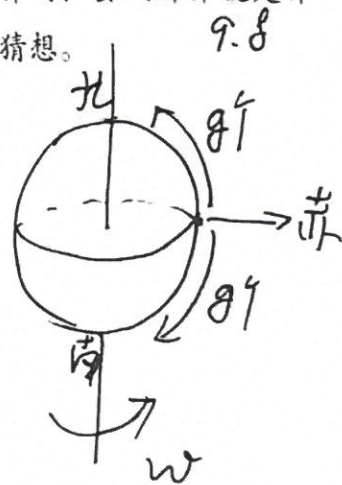
精确的实验发现，在地球表面不同的地方， g 的大小一般是不同的。在赤道的海平面处 g 为 9.780 m/s^2 ，在北京 g 为 9.801 m/s^2 。在一般的计算中， g 可以取 9.8 m/s^2 或 10 m/s^2 。^①

下表列出了一些地点的重力加速度。

表 一些地点的重力加速度

标准值: $g = 9.806 65 \text{ m/s}^2$		
地点	纬度	$g / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
赤道海平面	0°	9.780
马尼拉	$14^\circ 35'$	9.784
广州	$23^\circ 06'$	9.788
武汉	$30^\circ 33'$	9.794
上海	$31^\circ 12'$	9.794
东京	$35^\circ 43'$	9.798
北京	$39^\circ 56'$	9.801
纽约	$40^\circ 40'$	9.803
莫斯科	$55^\circ 45'$	9.816
北极	90°	9.832

► 你从表中发现了什么规律吗？你能尝试解释这个规律吗？尝试解释就是作出猜想。



做一做

用手机测自由落体加速度

很多智能手机都有加速度传感器。安装能显示加速度情况的应用程序，会看到白、绿、黄三条加速度图线，它们分别记录手机沿图 2.4-3 所示坐标轴方向的加速度变化情况。

把手机放在水平桌面上，让手机在桌面上沿 x 轴或 y 轴

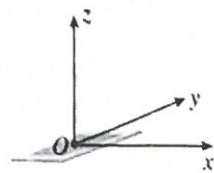


图 2.4-3

^① 本书中，如果没有特别的说明，都按 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 进行计算。

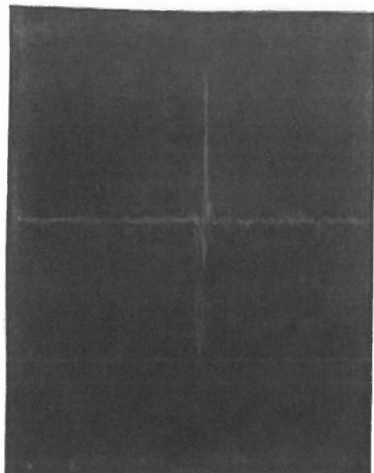


图2.4-4 手机截屏

方向平移一下，可以看到屏幕上加速度图线的白线或绿线出现一个波峰；把手机平放在手掌上，让手机在竖直方向移动一下，可以看到黄色图线发生变化。黄色图线记录手机竖直方向的加速度，测自由落体加速度，就是看黄色图线。

用手托着手机，打开加速度传感器，手掌迅速向下运动，让手机脱离手掌而自由下落，然后接住手机，观察手机屏幕上加速度传感器的图线（图2.4-4）。从图中可以看到，黄色图线有一小段时间的数值是 -10 m/s^2 ，这就是自由落体的加速度，方向向下。

我们还能看到，自由落体之后有一个向上的波峰，这是用手接住手机时手机做减速运动的加速度，方向向上。

► 世界是物质的，物质的运动有多种形式，例如机械运动、热运动和电磁运动等。这些不同的运动形式有着不同的运动规律，我们将陆续学习。

自由落体运动是初速度为0的匀加速直线运动，所以匀变速直线运动的基本公式及其推论都适用于自由落体运动。

把初速度 $v_0 = 0$ 和加速度 $a = g$ 分别代入匀变速直线运动的速度与时间的关系式和位移与时间的关系式，可以得到自由落体的速度、位移与时间的关系式分别为

$$v = gt, \quad x = \frac{1}{2}gt^2$$

科学漫步

伽利略对自由落体运动的研究

利用逻辑推理说明了重物与轻物下落得同样快后，伽利略并没有就此止步，而是进一步通过实验研究了自由落体运动的规律。

伽利略首先面临的困难是概念上的。因为那时人们连速度的明确定义都没有，所以，对伽利略来说，必须首先建立描述运动所需的概念。此前我们所学的概念，诸如平均速度、瞬时速度以及加速度等，就是伽利略首先建立起来的。

伽利略相信，自然界的规律是简洁明了的。他从这个信念出发，猜想落体一定是一种最简单的变速运动，而最简单的变速运动，它的速度应该是均匀变化的。但是，速度的变化怎样才算“均匀”呢？他考虑了两种可能：一种是速度的变化对时间来说是均匀的，即 v 与 t 成正比，例如每过1s，速度的变化量都是 2 m/s ；另一种是速度的变化对位移来说是均匀的，即 v 与 x 成正比，例如每下落

1 m, 速度的变化量都是2 m/s。后来他发现, 如果 v 与 x 成正比, 将会推导出十分荒谬的结果。

伽利略想办法用实验来检验 v 与 t 成正比的猜想是否是真实的。

伽利略所处的时代技术不够发达, 无法直接测定瞬时速度, 所以也就不能直接得到速度的变化规律。但是, 伽利略通过数学运算得出结论: 如果物体的初速度为0, 而且速度随时间的变化是均匀的, 即 $v \propto t$, 它通过的位移就与所用时间的二次方成正比, 即

$$x \propto t^2$$

这样, 只要测出物体通过不同位移所用的时间, 就可以检验这个物体的速度是否随时间均匀变化。

但是, 落体下落得很快, 而当时只能靠滴水计时, 这样的计时工具还是不能测量自由落体运动所用的时间。伽利略采用了一个巧妙的方法, 用来“冲淡”重力。他让铜球沿阻力很小的斜面滚下(图2.4-5), 而小球在斜面上运动的加速度要比它竖直下落的加速度小得多, 所用时间长得多, 所以容易测量。

伽利略做了上百次实验, 结果表明, 小球沿斜面滚下的运动的确是匀加速直线运动, 换用不同质量的小球, 从不同高度开始滚动, 只要斜面的倾角一定, 小球的加速度都是相同的。

伽利略将上述结果做了合理的外推: 当斜面倾角很大时, 小球的运动不是跟落体运动差不多了吗? 如果斜面的倾角增大到 90° , 这时小球的运动不就是自由落体运动了吗(图2.4-6)? 伽利略认为, 这时小球仍然会保持匀加速运动的性质, 而且所有物体下落时的加速度都是一样的!

伽利略的逻辑和实验自然使人钦佩, 但是人们又疑惑地问道: 为什么日常生活中常会见到, 较重的物体下落得比较快呢? 伽利略把原因归之于空气阻力对不同物体的影响不同。他写道: “如果完全排除空气的阻力, 那么, 所有物体将下落得同样快。”这时, 落体运动也就真正成为自由落体运动了。为此, 伽利略特别指出, 在科学研究中, 懂得忽略什么, 有时与懂得重视什么同等重要。

伽利略对运动的研究, 不仅确立了许多用于描述运动的基本概念, 而且创造了一套对近代科学的发展极为有益的科学方法。这些方法的核心是把实验和逻辑推理(包括数学演算)和谐地结合起来, 从而发展了人类的科学思维方式和科学研究方法。



图2.4-5 伽利略在做铜球沿斜面运动的实验(油画)

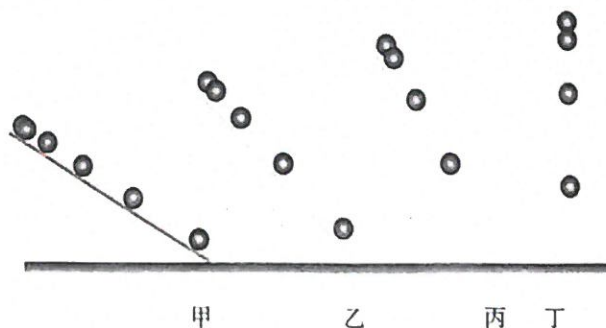


图2.4-6

从伽利略的一生看科学与社会

伽利略是伟大的物理学家和天文学家，意大利比萨大学和帕多瓦大学的教授，他融会贯通了当时的数学、物理学和天文学，在研究工作中开科学实验之先河，奠定了现代科学的基础。

在他所处的历史时代，文艺复兴绝不限于文学艺术的复兴，也是一次前所未有的科学振兴。文艺复兴的精神打破了束缚人们思想的桎梏，激发起人们对自然的兴趣和对自然的探索。活跃在人们心中的各种思想，终于得到了实在的结果。对于伽利略的成就和获得成就的方法，爱因斯坦的赞扬最具有代表性：“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。”

伽利略的科学生涯并不是一帆风顺的。他制作了天文望远镜（图2.4-7），并用它观测天空。观测结果支持了天文学的新学说——日心说。然而，日心说与《圣经》相抵触。伽利略不得不用《圣经》的语言来解释日心说，即便如此，仍然不能逃避教会对他的指控和迫害。《关于两个世界体系的对话》使日心说变成摧毁教会教义和传统“科学”框架的理论，因此立刻成为禁书。1633年伽利略被罗马宗教裁判所判处终身监禁。尽管如此，他仍坚持研究工作，并将自由落体等方面的研究成果转送荷兰，于1638年出版了《两种新科学的对话》。这部著作的出版，奠定了伽利略作为近代力学创始人的地位。



伽利略 (Galileo Galilei, 1564 — 1642)



图2.4-7 伽利略制作了天文望远镜

时隔359年，罗马教廷于1992年承认对伽利略的压制是错误的，并为他“恢复名誉”。但是教会对科学的干涉和对伽利略的迫害所造成的严重后果是无法挽回的。以前一直是人才辈出的意大利，在伽利略之后，它的科学活动很快衰落下去，在很长的一段时间里，没有再产生过重要的科学家。

1. 把一张纸片和一块橡皮同时释放下落，哪个落得快？再把纸片捏成一个很紧的小纸团，和橡皮同时释放，下落快慢有什么变化？怎样解释这个现象？

2. 跳水运动员训练时从5 m跳台双脚朝下自由落下，某同学利用手机的连拍功能，连拍了多张照片。测得其中两张连续的照片中运动员双脚离水面的高度分别为3.4 m和1.8 m。由此估算手机连拍时间间隔是多少？

$$h = \frac{1}{2}gt^2$$

3. 为了测出井口到水面的距离，让一个小石块从井口自由落下，经过2.5 s后听到石块击水的声音，估算井口到水面的距离。考虑到声音在空气中传播需要一定的时间，估算结果偏大还是偏小？

$$t = 2.5 \text{ s}$$

4. 有一架照相机，其光圈（进光孔径）随被摄物体的亮度自动调节，而快门（曝光时间）是固定不变的。为估测这架照相机的曝光时间，实验者从某砖墙前的高处使一个石子自由落下，拍摄石子在空中的照片如图2.4-8所示。由于石子的运动，它在照片上留下了一条模糊的径迹。已知石子从地面上2.5 m的高度下落，每块砖的平均厚度为6 cm，请估算这张照片的曝光时间。

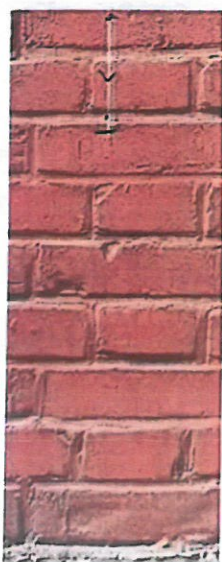


图2.4-8

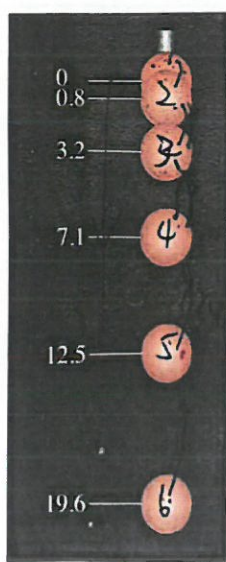


图2.4-9

单位: cm
求 a = ?
写出过程!

5. 频闪摄影是研究变速运动常用的实验手段。在暗室中，照相机的快门处于常开状态，频闪仪每隔一定时间发出一次短暂的强烈闪光，照亮运动的物体，于是胶片上记录了物体在几个闪光时刻的位置。图2.4-9是小球自由下落时的频闪照片示意图，频闪仪每隔0.04 s闪光一次。如果要通过这幅照片测量自由落体的加速度，可以采用哪几种方法？试一试。

照片中的数字是小球落下的距离，单位是厘米。

6. 制作一把“人的反应时间测量尺”。

如图2.4-10甲，A同学用两个手指捏住直尺的顶端，B同学用一只手在直尺0刻度位置做捏住直尺的准备，但手不碰到直尺。在A同学放开手指让直尺下落时，B同学立刻捏住直尺，读出B同学捏住直尺的刻度，就是直尺下落的高度，根据自由落体运动公式算出直尺下落的时间，就是B同学的反应时间。

利用这种方法，你能不能把下面刻度尺的长度刻度，直接标注为时间刻度，使它变为“人的反应时间测量尺”？请尝试在图2.4-10乙的长度刻度旁标注时间刻度。

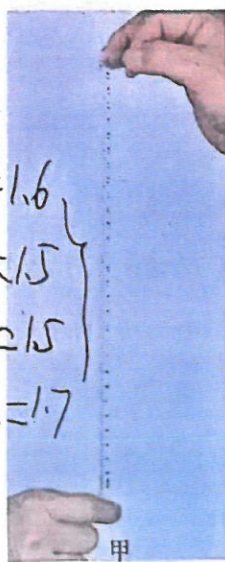


图2.4-10

$$0.04 \text{ s}$$

$$x_1 = 0.8 \rightarrow \Delta x_1 = 1.6$$

$$x_2 = 3.2 \rightarrow \Delta x_2 = 1.5$$

$$x_3 = 7.1 \rightarrow \Delta x_3 = 1.5$$

$$x_4 = 12.5 \rightarrow \Delta x_4 = 1.7$$