

# 走向统一的自然力

## 天上力与地上力的统一（II）

厉光烈 黄艳华

### 2. 地上的运动

地上运动，主要是物体的运动，例如，人抛物、马拉车、石下落、弦振动等。现在我们知道，人抛物的力、马拉车的力、绳子和弦的张力等，都是分子间力，也就是有效电磁力，只有导致物体垂直下落的地心吸引力才是我们所要讨论的与天上力对应的地上力，因此，本节主要讨论与物体垂直下落有关的自由落体运动和平抛运动。

#### 亚里士多德运动学说



亚里士多德

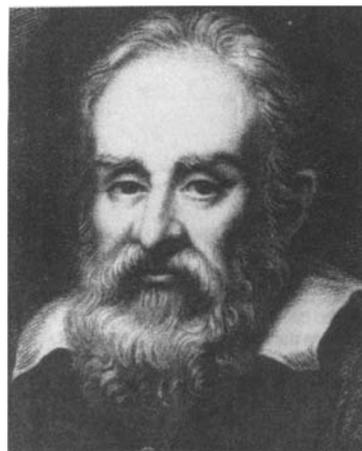
亚里士多德认为，万物由四种元素——土、水、火和气组成，各有其自然位置，任何物体都有为返回其自然位置而运动的性质。他把运动分成自然运动和强迫运动，例如，石下落就是自然运动；人抛物、马拉车就是强迫运动。自然运

动是物体为返回其自然位置而做的运动，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。亚里士多德由此得出结论：物体下落速度与其重量成正比。而要让物体做强迫运动，就必须有推动者，即施力者。以马拉车为例，马就是施力者。一旦马不再用力，车随即停止运动。如果马以恒定的力量拉车，车就以恒定的速度前进。正是这种常识启发亚里士多德得出一个普遍规律：要使物体运动，必须施加力；要使物体做匀速运动，必须施加恒定的力，而且较大的力产生成正比的较大速度。亚里士多德运动学说来自日常经验，有一定的合理成分，在历史上起过进步作用，后来被教会利用，奉为圣贤之言，当作教义，不可触犯。

到了16世纪，在文艺复兴思潮的影响下，开始出现对亚里士多德运动学说的质疑。例如，有人试图用理想实验来批驳亚里士多德关于“重物会比轻物下落得快”、“体积相同重量不同的小球，如果同时开始下落，重球应比轻球先落地”的观点，他们设想把一块重物 and 一块轻物用带子捆在一起，让它们自由下落。这两块物体加在一起的重

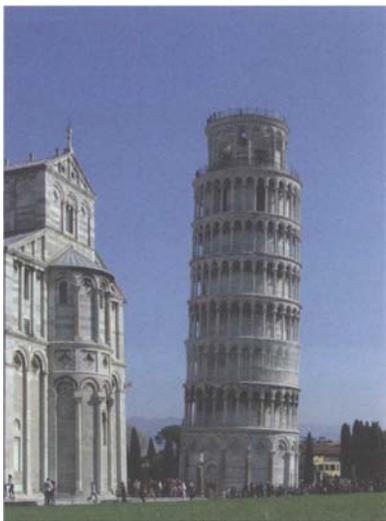
量肯定大于其中任何一块的重量。按照亚里士多德运动学说，捆在一起的物体应该比它们各自单独下落时落得更快。但是，如果从另一个角度考虑，既然重物应比轻物落得快，那么这两块捆在一起的物体就应该相互影响，慢的轻物会被快的重物拖快，快的重物又会被慢的轻物拉慢。因此，捆在一起时，下落速度应该比单独下落的轻物快，而比单独下落的重物慢。于是，同样依据亚里士多德运动学说，却得到了两个相互矛盾的结论。显然，要克服这一矛盾，就必须抛弃亚里士多德运动学说。

#### 比萨斜塔自由落体实验



伽利略

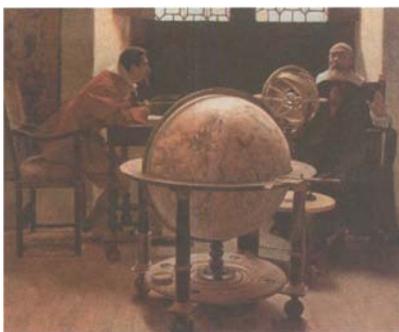
1591年的某一天，伽利略提着一个装有乌木和铅球的袋子，登上了比萨钟楼的塔顶，他要用实验



比萨斜塔

事实驳斥亚里士多德关于“物体下落速度与其重量成正比”的观点。塔下站满了欢笑的学生和持否定态度的哲学教授，伽利略向他们发出信号：“现在，我要放下两个体积相同，但重量很不相同的球，如果不计空气阻力，它们应当同时到达地面”……实际上，这只是一个脍炙人口的传说。在伽利略生前发表的著作中并未见到有关这一实验的记载。不过，在他之前，确曾有人做过类似的实验。1586年，荷兰人斯蒂芬（S. Stevin, 1542 ~ 1620）就在他出版的一本关于力学的书中写道：“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10倍，把它们从30英尺的高度同时丢下去，让它们落在地面一块木板或者其他什么可以发出清晰响声的东西上面，那么，我们会看到较轻铅球并不需要比重铅球多10倍的时间，而是同时落到地面上，因此它们发出的声音听上去就像一个声音一样。”后人之所以将这类实验归功于伽利略，主要是因为，在伽利略之前，

没有人敢于触犯亚里士多德，正是伽利略通过实验发现了自由落体定律，从而对亚里士多德运动学说进行了公开的批判。另外，在伽利略的学生维维安尼（Vincenzo Viviani, 1622 ~ 1703）于1654年写成而后在1717年出版的《伽利略生平的历史故事》一书中确实记载有这个故事；在伽利略去世200年后才被整理发表的他在1591年写成的小册子《论运动》中也记载有这类实验。



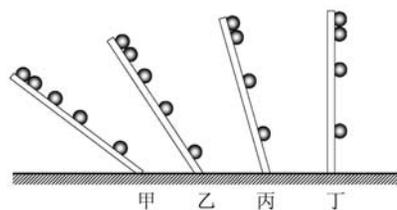
伽利略晚年在家里指导得意门生维维安尼

### 斜面实验与自由落体定律

伽利略不赞同亚里士多德把运动划分为“自然运动”和“强迫运动”，而是主张把运动分为匀速运动和变速运动。他直观地猜测：真空中的自由落体运动应该是最简单的变速运动——匀加速运动，并用极限概念来推想真空中的自由落体运动。他设想：把体积相同的金球、铅球和木球放在水银里，按照阿基米德浮力定律，只有金球下落，铅球和木球将浮在水银面上；如果把它们放在水里，则只有木球浮在水面上，金球和铅球都会下落，但金球会比铅球落得快一些；如果把它们放在空气中，它们都会下落，金球与铅球的落速差不多，木球会慢一些。伽利略由此得出“如果完

全排除空气阻力，所有物体都将下落得同样快”的结论。

进一步，他又设计了小球沿斜面滚下的实验，对落体运动做更为细致的实验和理论研究。他选择了一块长约6米、宽约25厘米的木板，在中间刻了一个凹槽，并尽可能地将其磨光。然后，他将木板斜放着，让一个黄铜球沿斜面无滑动的滚下，来测定小球滚下所需的时间 $t$ 及其与所滚过距离 $s$ 的关系。经过多次实验，伽利略发现，小球滚过的距离 $s$ 总是与经过时间 $t$ 的平方成正比。实验还证明，无论增大还是减小斜面的倾角，即斜面与地面的夹角，这个结论都不改变。另外，他还发现：小球的加速度与小球重量无关，只与斜面的倾角有关，斜面倾角越大，小球下滚的加速度越大，但不管斜面倾角有多大，加速度有多大，下滚加速度都与小球的成分无关。于是，他又设想，假如把斜面完全竖直起来，即斜面的倾角为 $90^\circ$ ，小球的下滚运动就成了自由落体运动（见下图），下滚加速度也就成了自由落体加速度。由此，他得出结论：在没有空气阻力时，自由落体的加速度与下落物体的重量和成分无关，也就是说，从同一高度下落的轻、重物体会同时落地，即它们所花的时间一样。这就是著名的伽利略自由落体定律。



斜面实验与自由落体运动

伽利略还用了一个公式来描述这种运动,即 $s=at^2$ ,其中 $a$ 随着斜面倾角的不同而有所变化,伽利略把它看作是“小球沿斜面下滚的加速度,现在我们知道,它的两倍才是小球下滚的加速度。顺便指出,这是伽利略第一次使用了数学语言来描述物体的运动。”

### 平抛运动及其运动分解

伽利略在晚年所著的《关于力学和运动两门新科学的对话》中曾藉萨尔维阿蒂在第四天的论述指出:“抛体运动是由水平方向的匀速运动和竖直方向的自然加速运动组成的”,并安排理想实验来证明:他将一块石头水平抛出,同时放开另一块石头任其竖直落下。结果发现,无论怎样改变抛出点离地面的高度,这两块石头都会在同一时间掉到地上,也就是说,沿曲线运动的平抛石块与从同一高度自由下落的石块在竖直方向上做相同的运动。实验还发现,水平抛出的石块在竖直方向上落得越来越快的同时,它在水平方向的运动既不加快也不减慢,也就是说,石块一旦抛出,就将保持其水平运动不变,即在水平方向上做匀速直线运动。鉴于抛出的石块在水平方向不再受到外力的作用,伽利略通过这一实验既批驳了亚里士多德关于“要使物体做匀速运动,必须施加恒定的力”的观点,也引入了惯性运动的概念。

### 惯性运动的来龙去脉

“不受外力作用的物体将保持惯性运动的状态不变”,早在古希腊时期,德谟克利特(Democritus,前460~前371)和伊壁鸠鲁



1593年伽利略利用斜面进行加速度实验

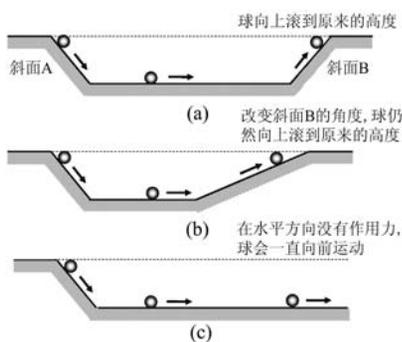
(Epicurus, 前342~前270)就有过这样的猜想。例如,伊壁鸠鲁曾经说过:“当原子在虚空中被带向前进而没有东西与它们碰撞时,它们一定以相等的速度运动。”但是,同时期的亚里士多德却不这样认为,他断言:力是维持物体运动状态不变的原因;物体只有在一个不断推动者的直接接触下,才能保持运动,一旦推动者停止作用,或两者脱离接触,物体就会停止运动。在谈到“人抛物”的运动时,他解释说,之所以抛体在出手后还会继续运动,是由于手在做抛物动作中同时也使靠近物体的空气运动,进而空气再带动物体运动。由于他的这种观点似乎与经验没有矛盾,所以,长期以来,一直在欧洲占据统治地位。

到了中世纪,才有人开始批驳亚里士多德的上述观点。公元6世纪,希腊学者菲洛彭诺斯就认为,抛体本身具有某种动力来推动它前进,直到耗尽,它才趋于停止。后来,他的这种看法被巴黎大学校长布里丹(Jean Buridan, 1295~1358)

和英国牛津大学的威廉(William of Ockham, 1300~1350)等发展为“冲力理论”。布里丹认为:“推动者在推动物体运动时,便对它施加某种冲力或某种动力。”威廉则指出:“当运动物体离开抛物者后,物体是靠自己运动,而不是被任何在它里面或与之有关的动力所推动,因为无法区别运动者或被推动者。”这就从根本上动摇了亚里士多德的推动说。显见,这里“冲力”或“动力”指的是推动者为使物体获得初始速度所用的力,也就是赋予静止物体以动量使其做惯性运动。后来,牛顿在其所著《自然哲学之数学原理》一书中将其称为“vis insita”,即“物体固有的力”,以区别于“外力”,实际上指的就是惯性。现在我们知道,力和动量是具有不同量纲的物理量,但在当时人们并未严格区分它们。正因为如此,有些书中也将“冲力”译成“动量(impetus)”。布里丹和威廉等人的工作对伽利略提出惯性运动的概念和牛顿弄清运动与力的关系影响甚大,在他们的著作中都留下

了“冲力理论”的烙印。

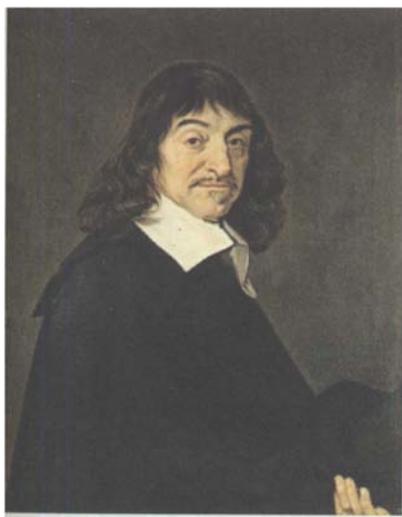
伽利略在自己的著作《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》(1632年)和《关于力学和运动两门新科学的对话》(1638年)中都曾通过斜面实验阐明了惯性运动的概念。下面,我们通过图解来说明他的见解:在下图 a 所示的斜面中,他让一个小球沿着左侧的斜面 A 滚下,此后,这个小球将会沿着右侧的斜面 B 向上滚动。他把斜面打磨得尽可能光滑,摩擦几乎可以忽略不计。在这种条件下,小球将会沿着斜面 B 向上滚动到它开始从斜面 A 滚下时相同的高度。然后,他改变斜面 B 的倾角,正如图 b 所示,小球还是向上滚动到原来的高度。伽利略非常重视这个实验事实,在此基础上,他进一步设想:如果逐渐减小斜面 B 的倾角,结果会怎样呢?由于小球应该总是向上滚到最初的高度,那么,随着斜面 B 的倾角不断减小,从斜面 A 滚下的小球就应该沿着斜面 B 越滚越远。如果最后把斜面 B 完全放置为水平(如下图所示),那么,小球就应该沿着这个水平面一直向前滚动。换句话说,在水平方向上,小球将在没有受到任何力作用的情况下一直继续滚动。于是,



斜面实验与惯性定律

伽利略根据这个理想实验大胆地提出了惯性运动的概念:一个不受外力作用的物体将保持它的匀速运动状态不变。

在伽利略之前,大多数科学家都坚信亚里士多德关于“匀速运动需要力来维持”的观点。通过上述实验,伽利略认识到,维持匀速运动不需要力,只有改变物体运动状态时才需要力。但是,伽利略的认识也有不足之处:他错误地以为匀速圆周运动也是惯性运动,也不需要力的作用,进而论证行星正因此才能永恒地绕日旋转。前面已经提到,开普勒在总结大量天文观测数据后发现,行星绕日运动不是匀速圆周运动,其轨道也不是圆而是椭圆。后来,笛卡儿(Rene Descartes, 1596 ~ 1650)弥补了伽利略对惯性运动认识上的这一欠缺。1644年,笛卡儿在《哲学原理》一书中明确指出:除非物体受到外力作用,否则它将永远保持其静止或直线运动状态。他还特地声明,惯性运动的物体永远保持在直线上运动,不会使自己趋向曲线运动。



笛卡儿

伽利略和笛卡儿对惯性运动的认识后来传给了牛顿,让他建立了惯性定律,即牛顿第一定律。

有趣的是,过了差不多3个世纪,爱因斯坦的广义相对论进一步修正了开普勒的行星运动定律,发现行星绕日的轨道在三维空间中不是囿于同一个封闭的椭圆,就像光线在引力场中不走直线而是沿四维时空中的测地线行进一样,行星绕日在四维时空中也是沿测地线行进,也就是说,行星绕日运动仍可看作是惯性运动(我们将在第三讲对此作更为详细的说明)。因此,伽利略把匀速圆周运动看成是惯性运动虽然是错误的,但他认为行星绕日运动是惯性运动却是正确的。在他那个年代,能有此认识,确实是伟大的天才。

### 运动与力的关系

前面提到,亚里士多德把运动分成自然运动和强迫运动,并认为,让物体做强迫运动,才需要有施力者,而“石下落”属自然运动,是物体为返回其自然位置而做的运动,是物体的自然属性,因此与力无关。虽然他也提到,物体越重,趋向自然位置的倾向性也就越大,下落速度也越大,也就是说,石下落的速度与物体重量有关,但是,他在这里并未将重量与重力相联系。伽利略通过实验批驳了亚里士多德,以平抛石块为例,他发现,这个被亚里士多德归类为强迫运动的平抛运动实际上可以分解为两个相互独立的运动。一个是水平方向的匀速运动,按亚里士多德的分类,它应是强迫运动,但是,人抛石块所用的力,实际上只是让石块在水

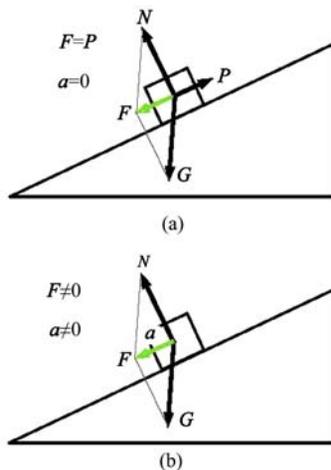
现代物理知识

平方向获得一个初速度，然后石块便凭借惯性做匀速直线运动，不再受到外力的作用；另一个是竖直方向的自由落体运动，按亚里士多德分类，它应是自然运动。但是，它却是与力有关的匀加速运动。伽利略还进一步通过斜面实验发现，做匀加速运动的物体的加速度正比于作用于其上的合力：如果一个物体在没有摩擦的斜面上被一根沿斜面向上的绳子拉着，并保持静止，那么这个物体除了受到绳子提供的沿斜面向上的拉力  $P$  外，必然还受到一个由其重力  $G$  和斜面的支持力  $N$  提供的与绳子拉力  $P$  相平衡的力，即  $G$  和  $N$  的合力  $F$ （见右图 a）。在伽利略之前，斯蒂芬已经证明：

$$\frac{P}{G} = \frac{h}{l}$$

其中  $h$  为斜面的高度， $l$  为斜面的

长度。显见， $P$  与  $\frac{h}{l}$  成正比。如果去掉绳子的拉力  $P$ ，那么物体就会在与  $P$  大小相等、方向相反的合力  $F$  作用下沿斜面向下运动（见下图 b）。也就是说，合力  $F$  也与  $\frac{h}{l}$  成正比。伽利略考察了沿不同坡度的斜面下滑的滚球的运动，发现其加速度正比于  $\frac{h}{l}$ 。综上不难看出，滚



匀加速运动的加速度与合力

球的加速度正比于合力  $F$ 。至此，伽利略通过斜面实验发现，力是改变物体运动状态的原因，不是像亚里士多德所讲的那样：“要使物体做匀速运动，必须施加恒定的力，而且较大的力产生成正比的较大速度”，而是“要使物体做匀加速运动，必须施加恒定的力，而且较大的力产生成正比的较大加速度”，从而弄清了运动与力之间的基本关系。后来，牛顿在此基础上清晰地阐述了他的第二定律。爱因斯坦对伽利略的贡献给予了极高的评价，在《物理学的进化》一书中，他写道：“伽利略的发现以及他所用的科学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。”正因为此，伽利略被后人誉为“近代科学之父”。

（中国科学院高能物理研究所 100049）



## 科苑快讯

### 欧洲大型强子对撞机创质子对撞能量新纪录

欧洲核子研究中心 2012 年 4 月 5 日发表公报称，欧洲中部时间当天 00 时 38 分，大型强子对撞机值班组报告对撞机达到束流稳定运行模式，两束各为 4 万亿电子伏特的质子束流在 4 个交汇点发生对撞，质子对撞的质心能量达 8 万亿电子伏特，创造了一项新世界记录，大幅增加了撞机发现新物理的潜力。

欧洲核子研究中心说，这标志着 2012 年大型强子对撞机正式启 24 卷第 2 期（总 140 期）

动运行，最大限度收集对撞数据。

该中心加速器及技术负责人史蒂夫·迈尔斯说，根据两年来每束质子束流最高能量 3.5 万亿电子伏特的运行经验，他们今年在不影响对撞机运行的情况下提高了能量。虽然能量提高幅度不大，但成倍增加了发现某些粒子的可能，比如发现超对称粒子的机会大增。

欧洲核子研究中心公报说，质子对撞的质心能量达 8 万亿电子伏特时，可能产生的希格斯玻色子数量将远大于质心能量 7 万亿电子伏特的状态，但是背景噪声与希格斯玻色子信号混淆的可能性也随之增加。因此，要确认或彻底排除希格斯玻色子的存在，还需要强子对

撞机运行一整年。

希格斯玻色子是粒子物理标准模型预言的一种基本粒子，是粒子物理当前研究的重点，迄今为止还没有找到。2011 年 12 月，欧洲核子研究中心的两个小组宣布，从强子对撞机的数据中发现了希格斯玻色子存在的迹象。一些科学家认为，寻找希格斯玻色子的范围已经大大缩小，今年可能取得成果。

强子对撞机预计运行到 2012 年底后长时间停机升级改造。2014 年下半年重新启动，逐步将质子束流加速至 7 万亿电子伏特的最高设计能量。

（摘编自 2012 年 4 月 5 日新华网，作者杨京德、刘洋）