

# 落体运动观：演变、分析及讨论

冯一兵 邢伟



## 一、落体运动观的历史演变

亚里士多德的落体运动观 运动是万物的本性。西方有一句谚语：“对运动无知，也就是对大自然无知”。物体从空中下落的运动，自古就引人注目。例如，花瓣、果实和枯叶等从树上掉下。正是基于对日常现象的观察，古希腊哲学家亚里士多德凭感性经验直觉地认为，物体下落得快慢与其重量有关，他说：“正如一块铅或金或其他任何有重量的东西的下落速度正比于它的大小一样”，“如果一物体比另一同体积物体更重的话，也会落得更快”。亚里士多德在他所著的《物理学》第四卷第八章中进一步指出：“我们看见一个已知重物或物体比另一个快，有两个原因：或者由于穿过的介质不同（如在水中、土中或空气中），或者其他情况相同，只是由于各种运动物体的重量或轻重不同”。亚里士多德对此还进行了似是而非的解释，他认为物体重量是物体下落的原因，而物体之所以有重量，是因为该物体包含其“天然位置”在下的“土元素”及“水元素”，物体重量可以用来衡量物体下落“欲望”程度的大小，物体包含的“土元素”及“水元素”越多，就越重，它趋向其自然位置——地心的要求就越强烈，由此也就得出了物体下落速度同其重量成正比的结论。

伽利略的落体运动观 关于亚里士多德的落体运动观点，应当说，在伽利略 1598 年任比萨大学教授之前，就已受到不少人的质疑。如法国的奥勒姆斯、葡萄牙的托马斯、牛津教授海特斯伯格和意大利的达·芬奇等，他们通过对落体运动的一般观测、推论，得出了物体下落距离与时间的关系，从理论上揭示了亚里士多德落体理论的内在矛盾。1586 年，比利时著名物理学家斯台文还曾通过两球同时下落的实验，试图否定亚里士多德的理论。但客观地说，亚里士多德的观点并不能一下子被神话般地驳倒，因为实际上，物体下落总存在介质阻力，而在有介质阻力的情况下，亚里士多德的理论是有一定合理性的，或者说，仅靠当时的落体实验是不容易驳倒亚里士多德落体观点的。

伽利略注意到在实际的物体下落运动中，轻物

体确实落后于重物，但他经过大量实验和认真思考后认为这是由于空气阻力造成的，他确信在没有空气的真空中所有物体下落得都同样快。他为此设计了一个实验：分别用铅、金和木做了三个球，并让这三个球分别同时在水银、水和空气里下落。在水银里，只有金球往下落，在水里金球和铅球都往下落，而金球下落得比铅球更快，在空气里所有三个球都下落，这时金球与铅球的下落速度似乎没有什么差别，只有木球下落得稍慢一些。接着，他做了如下巧妙的推论：如果我们事实上发现重量不同的物体在介质中下落时，它们速度的差别随介质的密度减小而减小，而且介质非常稀薄时，这一差别会很小而不能被觉察，于是就可推知物体在真空中下落的情况。他在《两门新科学》中写道：“鉴于这点，我认为如果人们完全排除空气的阻力，那么，所有物体将下落得同样快。”

伽利略还曾运用逻辑的力量反驳亚里士多德。为此，他设想了一个大家所熟知的“落体谬”的理想实验：“如果我们取‘天然速率’不同的两个物体，并把它们连接在一起，显而易见，速率较大的那个物体将因受到速率较小的物体的影响，其速率要减慢一些……但是两个连在一起的物体当然比原来的重物还要重，于是，这就从较重物体较轻物体运动得快的假设推出了较重物体运动较慢的结论来。”显然，这一矛盾的产生源于“重物比轻物下落快”的前提，而唯有认为重物与轻物下落一样快，才能避免这一矛盾。

伽利略不仅对亚里士多德的落体运动观提出质疑，而且通过理论分析和实验探索发现了自由落体运动定律，这极大推动了科学发展和人类进步。

## 二、两种落体运动观的理论分析

一般情况下，重物（假设为球体，质量为  $m$ ）在空气中下落时将受到重力  $G = mg$ （其中， $g$  为重力加速度）、空气浮力  $F_B = \rho g V$ （其中  $\rho$  为空气密度、 $V$  为小球体积）以及英国物理学家斯托克斯提出的

半径为  $R$  的球体所受的空气粘滞阻力  $F_v = 6\pi R\eta v$  (其中,  $\eta$  为空气粘滞系数,  $v$  为小球下落速度) 三个力的作用, 根据牛顿第二定律有

$$m\frac{dv}{dt} = mg - 6\pi R\eta v - \rho g V, \quad (1)$$

对于一般较小的球体, 其所受的空气浮力较小, 故以下讨论中可忽略不计。现让一小球在空气中下落, 在释放的瞬间, 小球静止, 即  $v=0$ , 此时有

$$m\frac{dv}{dt} = mg. \quad (2)$$

此时任何物体皆以加速度  $g$  开始下落 (若无空气阻力, 这一加速度保持不变, 不同物体将会同时下落), 因此物体的下落是以伽利略所描述的方式开始的。随后由于小球加速, 速率和粘滞力都将增大, 从而又使加速度不断减小, 最终物体速度的增大 (尽管加速度越来越小) 使  $mg - 6\pi R\eta v - \rho g V \rightarrow 0$ , 当其等于 0 时, 物体受力达到平衡, 从此将以一个不变的极限速度  $v_m$  下落。同时, 由下面的讨论我们会看出  $v_m \propto m$ , 因此物体的下落是以亚里士多德的方式结束的。

在忽略空气浮力时, 由方程 (1) 可得

$$\frac{dv}{dt} = g - 6\pi R\eta v/m. \quad (3)$$

从方程 (3) 可以看出,  $6\pi R\eta/m$  应具有  $s^{-1}$  的量纲单位, 所以  $T = m/6\pi R\eta$  应具有  $s$  的单位。方程 (3) 可变为

$$\frac{dv}{dt} = g - v/T. \quad (4)$$

在物体下落速度  $v=v_m$  时,  $dv/dt=0$ , 此时有  $g=v_m/T$ , 则  $T$  即为小球获得极限速度所用的时间, 代入方程 (4) 得

$$\frac{dv}{dt} = (v - v_m)/T, \quad (5)$$

解方程 (5) 可得

$$v = v_m(1 - e^{-t/T}). \quad (6)$$

从 (6) 式可知, 当  $T$  小时,  $v$  迅速趋近于极限速度  $v_m$ , 物体下落过程中的大部分时间以  $v_m$  下落, 且  $v_m \propto m$ , 此时不能忽略空气阻力, 这符合亚里士多德的运动描述; 当  $T$  大时,  $v$  将会经过很长时间才能趋近于极限速度  $v_m$ , 此时阻力的影响相对较小, 若在一较短的时间内, 此运动倾向于伽利略的运动描述。

### 三、讨论与评价

从 2000 多年前亚里士多德的落体运动观算起, 人类对落体运动的认识经历了漫长而又曲折的发展过程, 对于此发展历史我们应有一个比较客观的认识和评价。

首先, 我们应认识到两种落体运动观产生的前提和条件。伽利略所强调的是物体在只受重力作用

下的自由落体运动, 而这种情况只是一种理想化, 在现实生活中并不存在。当然, 伽利略能够透过空气阻力存在时重物比轻物下落快的表面现象, 认识到在不存在空气阻力情况下物体下落快慢与其重量无关的本质规律, 这不仅充分体现了伽利略的聪明与智慧, 而且更使这一理想情况下的法则具有一般规律上的意义。但我们不应因伽利略理论而完全否定亚里士多德的观点和历史功绩, 其实客观地说, 亚里士多德研究的是不同条件下的落体运动, 与伽利略所研究的不存在介质阻力情况下的自由落体运动不同的是, 亚里士多德是抱着“不可能有真空”的信条, 带着自然哲学的框架 (如他的“四元素”说), 并基于日常现象的观察, 给出了存在空气阻力情况下重物比轻物下落快的落体运动观。

其次, 唯物辩证法告诉我们, 真理既是绝对的, 又是相对的, 因而在我们认识真理的同时, 也必须认识到真理的这种相对性。在亚里士多德时代, 研究物理学主要是依靠建立在观察基础上的直觉和思辨来进行的。所以, 他很多关于物理学方面的论述, 虽然今天看来并不完善, 甚至是错误的, 但在当时能够摆脱神的意志, 特别是能依据一定经验而非完全思辨, 并最终形成一套自圆其说的体系, 也是难能可贵的。由于亚里士多德生活的时代要早伽利略近 2000 年, 用历史的观点看, 我们不应苛求从来就不相信存在真空的亚里士多德也能像伽利略那样, 透过现实存在认识到理想情况下的自由落体运动规律。对亚里士多德的落体运动观, 我们也应客观地将其置于合乎实际的条件下去理解, 他的这一观点毕竟是由原始的直接经验得来的, 理所当然有其合理性。

最后, 我们还应全面、辩证地看待和评价亚里士多德。在物理学界, 我们发现, 有人常常把亚里士多德当作“反面教材”对待。比如在讨论落体运动快慢和运动产生原因两个问题上, 亚里士多德就“理所当然”地成为批判对象。我们认为这可能是对亚里士多德本人乃至科学史缺乏了解造成的, 当然也有人云亦云的从众心理。今后, 我们最好纠正这一不当做法, 而结合当时历史条件辩证地看待一个古代科学家的观点, 看到他对其他科学发展的贡献以及人类文明的推动, 而不是只依据其在当时情况下某一方面的错误认识就简单地将其全面否定。

(河南省信阳师范学院物理与电子工程学院 464000)