较重的物体下落得更快吗？

1

托尼·克里斯蒂Thony Christie在帖子《文艺复兴时期的数学》The Renaissance Mathematicus (https://thonyc.wordpress.com/2023/08/16/from-%cf%84%e1%bd%b0-%cf%86%cf%85%cf%83%ce%b9%ce%ba%ce%ac-ta-physika-to-physics-iv/)中说道：

亚里士多德将下落fall定义为自然运动natural motion……首先，亚里士多德的落体定律并不像人们想象的那么错误；其次，它们比伽利略更早地受到挑战和纠正。

量子物理学家卡洛·罗微利Carlo Rovelli (Aristotle's Physics: a Physicist's Look)说：

与通常的说法相反，亚里士多德的物理学是反直觉的、基于观察的，并且是正确的（在其有效性领域中），就像牛顿物理学（在其领域中）是正确的一样。

托尼也指出：

如果我从橡树上掉下来一个铅球，它显然比我在扔球时掉落的橡子掉到地上的速度要快。在现实生活中，并非所有物体都以相同的速度下落。只有在真空中才会出现这种情况。

亚里士多德的“落体定律”不是纯粹定性的。它可以总结为

v ∝ W/ρ

其中 v 是速度，W 是物体的重量，ρ 是介质的密度。亚里士多德用下落给定距离的时间来表达他的定律，由于 T ∝ 1/v ，亚里士多德的落体定律也可以表示为：

T ∝ ρ/W.

罗微利还说：

在《物理学》中，亚里士多德指出物体的下落速度与其重量成正比，与它们浸入其中的流体密度成反比。这是对地球引力场中在空气或水中运动的物体的正确近似。

然而这是一个现代神话。简单的实验表明，物体在空气中以与其质量成正比的速度下落的说法是完全错误的。

当然，“所有物体在任何情况下都以完全相同的速度坠落”的断言也是相当错误的。但伽利略从未这么说过，他的《关于两种新科学的对话》包含了大量对空气阻力resistance的影响的讨论。在对皮革水袋 leather bladders的讨论中，伽利略也谈到了空气中的浮力Buoyancy in air 。

取一些日常的例子：

一张皱巴巴的纸——质量约为4克，由于纸团的体积要大得多，这应该会增大空气摩擦的影响——和一个468克的镇纸，根据亚里士多德的说法，在给定距离上的下落时间的比例应该与它们的质量成反比，即117:1。从约1.5米的距离下落，镇纸花费的时间大概是½秒。所以纸团应该花一分多钟的时间才掉下来——情况当然不是如此！

当然，单用手让完全两个物体在完全相同的时间下落并不容易，所以它们实际上并没有同时下落。\*

如果说这只是1.5米的情况，那么在更高的时候，比如从窗户扔到草地上——这大约是7米，情况也是类似的：

保龄球：6200克，1.17秒

网球：59克，1.27秒

高尔夫球：45克，1.15秒

乒乓球：5克，1.64秒

而亚里士多德的律则=预测保龄球与乒乓球下落时间的比例为1240:1。

乒乓球和保龄球之间的时间差约为½秒，很容易被感知到。（0.1秒大约是“动作被视为‘瞬间’的阈值”。\*\*）

但要说，“亚里士多德的落体定律实际上是基于简单的日常经验观察”——这是言过其实的。

没有人否认亚里士多德用了他的眼睛。但历史上的争论是在他的定律的起源是经验的，还是先验的。但是很难相信，一个经验起源的理论会在如此简单的例子上得到如此错误的结果。

那么“较重的物体下落得更快“这一更弱的说法呢？(毕竟，技术上来说，这在空气中是正确的。）好吧，我们有一些例子支持这一论点，但许多例子却与之相反。以保龄球和高尔夫球作比较，尽管两者质量的比值是 138:1，但时间上的差异并不明显。就真正的日常经验而言，比如 2 米的高度，即使是橡子/铅球下落的时间差也不会明显。

而”更重的东西下落得更快“的说法就是从这种橡子/铅球比赛开始的——仔细想想，这种说法就不攻自破了。在日常生活中，你能经常看到铅球（或石头）和橡子同时从树上掉下来吗？但假设你看到了。如果橡子比铅球早几分之一秒落地呢？你会不会惊呼：”嘿，轻的物体比重的物体落得快！“或者你会得出结论：橡子一定是先下落的？这种思维定式不是来自普通经验，而是来自心理因素。换句话说，它是先验的，而不是经验的。

伽利略雄辩地反驳了亚里士多德的辩护：

但是，辛普里西奥，我相信你不会像其他许多人一样，把讨论的重点转移到我的一些离真理只少了一根头发的陈述上，而在这根头发之下，却隐藏着另一个像船缆一样大的错误。亚里士多德说：”一个一百磅重的铁球从一百立方英尺的高处落下，在一个一磅重的铁球落下一立方英尺之前，就已经到达了地面。“我说它们是同时到达的。你在做实验时发现，大的比小的快两指宽，也就是说，当大的到达地面时，另一个比它少两指宽，现在你不会把亚里士多德的九十九腕尺（cubits）藏在这两指之间，你也不会在提到我的小错误的同时，默默地忽略他的大错误。

——《关于两门新科学的对话》，第 1 天 \*\*\*

2

你可能会问："如果亚里士多德的落体定律是如此明显的错误，为什么人们过了近两千年才意识到它的错误？

事实并非如此。据我所知，最早的反驳记录来自约翰·菲洛波努斯（John Philoponus），他生活在约公元 490 年至 570 年之间。正如克拉吉特（Clagett）在《古代希腊科学》（Greek Science in Antiquity）中所引述的那样：

但这（亚里士多德的观点）是完全错误的，我们的观点可以通过实际观察得到证实，这比任何口头论证都更有效。因为如果让两个砝码从同一高度落下，其中一个砝码的重量是另一个砝码的好几倍，你就会发现，运动所需的时间比并不取决于砝码的重量，而是时间上的差别非常小。同样，如果两个砝码的重量相差不大，也就是说，如果一个砝码的重量是另一个的两倍，那么时间上就不会有差别，或者差别很小，尽管一个物体的重量是另一个的两倍，重量上的差别是不可忽略的。

菲洛波努斯的写作时间大约在亚里士多德之后 900 年，还是相当长的。为什么不早点提出异议呢？我有一些想法：

亚里士多德的落体定律在那个时期是否被普遍接受？可能没有。历史记录并不完整，但具有暗示性。克拉吉特提到了物理学家斯特拉托Strato the Physicist（又名兰普萨克斯的斯特拉托Strato of Lampsacus，约公元前 335 年至公元前 269 年），“他的观点往往与亚里士多德的观点截然不同......斯特拉托作为实验家显然享有当之无愧的声誉。......斯特拉托创作了一部现已失传的著作，名为《论运动》On Motion”。天文学家希帕克斯Hipparchus（约公元前 190 年至公元前 120 年）写了一篇论文，现在已经失传，名为《论因重量下坠的物体》On Bodies Carried Down by Weight。根据克拉吉特的说法，菲洛波努斯的许多观点可能来自希帕克斯。

人们对这一主题的关注程度如何？亚里士多德几乎在所有方面都留下了著作；为后来的学者提供了大量素材，而不必让ta们走上这条道路。

传统的解释是：中世纪的思想家们不加批判地追随亚里士多德，重复他的立场，而不对其进行检验。我们现在知道这与事实相去甚远。但这并不意味着它百分之百是错误的。\*\*\*\*

3

我看到过有人这样为亚里士多德的落体定律辩护： “不要从字面上理解他！他并不精通数学；当他说‘成反比’时，他只是在隐喻——就像人们说‘指数大于’时，他们对y=e^x只有最模糊的概念一样”。我把这叫做“数学能力差”辩护。

好吧，让我们看看亚里士多德写了些什么。首先，在《论天》On the Heavens（第 1 章Bk 1第 6 部分Part 6）中：

给定的重量在给定的时间内移动一定的距离；同样大和更大的重量在更短的时间内移动相同的距离，时间与重量成反比。例如，如果一个砝码是另一个砝码的两倍，那么在一定时间内移动的距离就是另一个砝码的一半。

最后一句话很像老师为了说明这个概念而说的话。亚里士多德每次提到比例时，都会提到 2:1 的比例。即使你声称（荒谬地）这是他唯一真正理解的比例，在这种情况下，时间上的差异通常是难以察觉的。此外，如果你看一下周围的文字，你会发现讨论涉及比例理论更复杂的方面，比如可比性commensurability和“anthyphairesis”。

在《物理学》（第四章第 8 部分）中，亚里士多德讨论了其定律的 T∝ρ 部分：

我们看到相同重量的物体比另一个物体移动得快，有两个原因，一是因为物体移动所经过的地方不同，比如水、空气和大地；二是因为在其他条件相同的情况下，移动的物体由于重量或重量轻而与其他物体不同。......假设 B 是水，D 是空气；那么，由于空气比水更薄、更无实体，A 穿过 D 的速度就会比穿过 B 的速度快。那么，如果空气的稀薄程度是水的两倍，那么人体通过 B 所需的时间就是通过 D 所需的时间的两倍......

在这两段文字中，他（措辞混乱地）给出了 ρ=0 和 W=∞ 不可能的论据。亚里士多德完全掌握了他的定律的限制行为。

无论你怎么评价亚里士多德，他都受过高等教育，而且非常聪明。他在柏拉图的学院混了几十年，那里有一些一流的数学家（Theaetetus、欧多克索斯Eudoxus of Cnidus 和 阿尔库塔斯 Archytas of Tarentum），还有著名的几何学入学要求（启示录）。在亚里士多德出生之前，比率和比例在希腊数学中就已确立。著名历史学家托马斯·希斯爵士Sir Thomas Heath在他的《希腊数学手册》A Manual of Greek Mathematics中这样写道：

亚里士多德显然不是专业数学家......但他喜欢数学式的解释......学院使用的教科书无疑是 Theudius 的，这可能是亚里士多德的资料来源。......亚里士多德显然熟知欧多克斯的比例理论；他经常使用比例术语……

为亚里士多德所作的“数学上的无能”式辩解只有一个理由：为他的“落体定律”的彻底失败找借口。

……

我的重点是亚里士多德的物体在空气中的落体定律。托尼和罗微利还讨论了许多其他问题：水中的物体、四元素理论、亚里士多德的天文学、他的四因说以及他在科学史中的作用。在这些领域中，亚里士多德在某些方面更胜一筹。

史蒂文·温伯格在他的《解释世界》To Explain the World: The Discovery of Modern Science 一书中对亚里士多德的影响做出了更为负面的评价。

托尼的文章一如既往，以历史学家的视角（我相信这也是现代历史学家的共识）进行了精湛的分析。与罗韦利对亚里士多德物理学的大肆鼓吹不同，托尼的主要目的是纠正老式的“亚里士多德只得了个 F 的分数”的观点。我怀疑我的分歧点完全来自于他对维基百科引文的依赖。

那么： 亚里士多德，对物理学是好是坏？要通过实验来确定答案，我们应该发明一台时光机，回到过去让亚历山大用标枪杀死亚里士多德，然后再看看 1500 年代的意大利发生了什么......

\* 一位教授（休斯顿大学的John Lienhard）用这一点论证伽利略确实做了斜塔实验：

伽利略时代没有描述实验研究的传统。对照实验几乎是未知的。所以伽利略的报告相当草率。他似乎从一座塔上扔下了不同的球。但重量是多少？什么塔？我们可以很确定那是比萨斜塔。但我们最终怀疑他是否真的做了这个实验。也许他只是报告了他认为应该发生的事情。

实验的一个结果让伽利略感到惊讶，也让我们感到惊讶。伽利略发现，沉重的球首先击中地面，但稍微快一点点。除了空气阻力造成的微小差异外，两个球的速度几乎相同。这让他很惊讶。这迫使他放弃亚里士多德关于运动的思想。如果他真的做了这个实验，那肯定是科学史上的一个转折点。

但让我们惊讶的是伽利略所说的在他释放两个球之后发生的事情。他说，较轻的球总是比较重的球起步快一点。然后那个沉重的球追上来了。这听起来很疯狂。

因此，托马斯·萨特尔Thomas Settle 和唐纳德·米克利奇Donald Miklich 在摄像机前重现了伽利略的塔式实验\*。一名助手拿着四英寸长的铁球和木球，与伽利略一臂之遥，因为伽利略必须拿着它们才能越过比萨塔顶的宽栏杆。事实证明，当你试图同时放下它们时，你紧张的肌肉会愚弄你。你总是先放开较轻的那个，也就是你抓得不那么紧的那个。这意味着伽利略准确地报告了他所看到的情况。毫无疑问，他确实做了这个实验。

\* Settle, T. B., Galileo and Early Experimentation, Springs of Scientific Creativity, (F. Aris, H.T. Davis, and R.H. Stuewer, eds.). Minneapolis: University. of Minnesota Press, 1983, pp. 3-20.

https://engines.egr.uh.edu/episode/166

\*\* https://psychology.stackexchange.com/questions/1664/what-is-the-threshold-where-actions-are-perceived-as-instant

\*\*\* https://oll.libertyfund.org/titles/galilei-dialogues-concerning-two-new-sciences

\*\*\*\* \*\* 如

. 法国经院哲学家让·布里丹 约1292—1358 认为，如果按亚里士多德的有关地球自转的观念，地球是围绕其轴进行自转，那么在一个无风的日子里，与地球表面垂直向上射出的箭将不会落回原处，因为地面在它下面向前移动了，既然垂直向上射出的箭垂直落回原处，那么，地球应该是静止不动的。但奥里斯梅Nicole Oresme，1323—1382 认为，我们所感知到的运动都是相对运动，在旋转的地球上，一支垂直向上射出的箭同时带有一个水平运动，使之始终处于它在地面射出点的上方，使之能够垂直下落回到原处，这点正如在一艘平稳运行的船上人意识不到船在运行一样。（但是奥里斯梅本人以及同时代人并不打算接受这一思想。）

[美]戴维·林德伯格：《西方科学的起源》(第二版)，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2013年，第313-314页

. 亚里士多德认为，无论是有生命的东西还是无生命的东西，都是被另外的东西所推动。在有生命的物体如动物中，灵魂是推动者，动物的躯体是受动者，在天体或行星运动中，推动者是天智(a celestial intelligence)，受动者是行星的物理球。在这两种情况下，推动者和受动者都可以区别开来，但无法在物理上或空间上将两者分离开。在无生命物体的强制和自然运动中，推动者和受动者可以在物理上分开。亚里士多德以这样的方式描述运动：一块向上投掷的石头，维持其运动的动力是石头穿过的空气——外部媒介，第一单元受扰的空气推动石头，同时也扰动邻近的第二单元空气；第二单元受扰的空气推动石头使其运动得更远，同时也扰动邻近的第三单元的空气，依此类推。随着过程的继续，各单元空气的动力依次逐渐减弱，直至到达不能再激发下一单元空气的那一单元为止。这时，石头开始自然下落。

亚里士多德认为，媒介既是动力又是阻力，阻力随媒介的密度增大而增大，减小而减小，运动时间随之增加而增加，减小而减小。既然如此，如果媒介消失，也就是真空状态——虚空，将会没有阻力，速度将会达到无限大，运动也就是瞬时的，而不是有限的和连续的。(这当然是不可能的)。由此，亚里士多德否认有任何形式的真空存在而提出“以太”的概念。他认为：“世界必定是一个完满(Plenurm)，月下区充满了由四种元素构成的物体，而月上区充盈着神圣的不可变的以太。”

阿拉伯注释家阿维罗伊在对亚里士多德《物理学》的注释中，转述了阿芬巴塞Avempace ？—1138 否定亚里士多德的看法——物体下落时间与它下落时所穿过的外部媒质密度成正比，因而也与阻力成正比。阿芬巴塞争辩说，如果从一点到另一点运动所需的时间仅仅归因于中介媒质的阻滞能力，亚里士多德这一断言就该是真的。但是，亚里士多德已经观察到，尽管天上没有媒质的有效阻力，但是，所有的行星和恒星仍以各种不同的有限速度作圆周运动，并不瞬时地从一点运动到另一点。据此，阿芬巴塞推理道，一个阻滞媒质对运动的发生不仅不是必需的，而且它的唯一功能只是阻滞运动，普通可观测的运动是假设的未受阻碍的运动减去媒质的阻滞以后所剩下的运动。

他的这种批判随着阿维罗伊的著作被译成拉丁文后不久，就广泛地流传开来，并且引发了进一步的修正和争论。阿奎那接受了阿芬巴塞的解释并且认为，无阻力媒介中的运动应该是有限的，真空中的运动并不是不可能的，而是可能的，是有限的和连续的，因为空虚的空间至少跟填满了物质的空间一样，是一个展延的、有维度的容器。

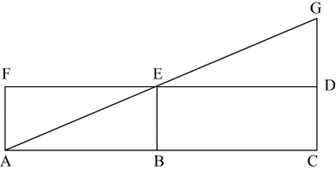
贝内代蒂Giovanni Battista Benedetti 1530—1590发展出一种冲力物理学，否定了介质的推动作用，认为冲力由施动者传递给运动物体而维持物体运动。最终，伽利略在接受上述反亚里士多德思想的基础上，成功地为媒介阻力提供了一个客观测量的方法，比较完美地解决了上述难题——物体下落时阻滞媒介仅是一个阻滞因素，它的真正的自然运动只出现在真空中，尽管真空是假设的；所有的物体在真空中都以同等的速度下落。

[美]爱德华·格兰特：《中世纪的物理科学思想》，郝刘祥译，上海：复旦大学出版社，2000年，第43-4页。

. 鲁塞尔的杰拉德撰写《运动之书》(Book on Motion)一书，将论题集中于运动学，即只考虑物体运动本身的数学描述而不考虑物体运动的原因。这种研究传统被14世纪(1325—1350年)活跃于牛津大学默顿学院的一批逻辑学家和数学家所重视，形成默顿学派Mertonians 。他们严格区分了运动学和动力学，认为动力学探讨运动的原因，描述运动产生者的推动力，运动学分析运动的结果；努力发展出一套概念体系和专业术语如匀速运动、匀加速运动、非匀加速运动，给出了与今天一样的匀加速定义——某运动物体的速度在相等的时间单位里增量相等，则该物体为匀加速运动；在进一步区分属性的强度(intensity，如密度)和量(quantity，如重量)的基础上，给出“匀速定律”(mean-speed theorem)：做匀加速运动的物体在一定的时间里所走过的路程，与以匀加速运动的平均速度做匀速运动的物体在相同时间里走过的路程相等。

在上述运动学的数量化方面，奥里斯梅是杰出代表，他用几何图案来表示某物运动时速度随时间变化的情况。之后，他把运动的总量等同于物体走过的距离。水平线代表物体运动的某一时刻，垂直线代表的是速率的变化，也就是强度的变化。各垂直线等高的图形——矩形表示的是匀速运动，在各个时间点上速率相同，故用；三角形表示的是均匀的非匀速运动(即匀加速运动)，在相同的时间间隔内速度的变化量相等；呈现出不规则的形状的图形表示的是非均匀的运动(即非均匀的加速运动)。

奥里斯梅为“匀速定律”提供了简洁明了的证明：在图中，匀加速运动由三角形ACG表示，该三角形的面积表示的是物体运动的距离；由该三角形表示的匀加速运动的物体平均速度由BE表示，以中速度运动的物体运动的距离是矩形ACDF的面积；由于在图6.2中，三角形AFE的面积与三角形EDG的面积相等，所以，“匀速定律”成立。根据图，奥里斯梅还提出匀加速运动的第二个定律：做匀加速运动的物体在前半段时间里所经过的距离与后半段时间里所经过的距离是1∶3的关系。证明类似于前例。



[美]戴维·林德伯格：《西方科学的起源》(第二版)，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2013年，第337页图12.8 “奥雷姆对默顿规则的几何证明”

“在相当大程度上，伽利略对落体的运动学分析就是发挥和运用了从14世纪牛津和巴黎发展出来的运动学基本原理。伽利略能够认识到运动学和动力学之间的差别这一事实，揭示出布拉德沃丁Thomas Bradwardine，约1300—约1349 和奥里斯梅以来科学传统的影响。当我们研究伽利略的运动学时，他所用的概念框架，包括空间、时间、速度和加速度概念，很明显是中世纪运动学的概念框架，他的数学方法也大量取自14世纪。完整的伽利略理论中的主要部分源于中世纪的具体定理，包括‘均速定率’和‘默顿规则’。的确，现在作为伽利略运动学成就具体表现(V∝t和S∝t2)的有关数学关系的部分，正是14世纪提出的定义或定律的简单表述。”

[美]戴维·林德伯格：《西方科学的起源》，王珺、刘晓峰、周文峰等译，北京：中国对外翻译出版公司，2001年，第380页。

“中世纪自然哲学家在两个重要方面区别于近代早期的科学家，一是他们通常并不把实验当作获取知识的手段，二是他们缺乏科学进步这一实用概念。中世纪的哲学家试图表明，被亚里士多德视为荒谬和不可能的一些观念实际上是可能的和可理解的，虽然它们存在的可能性很小。”

张卜天：《中世纪自然哲学的思维风格》，《科学文化评论》，2011年第3期，第32页。