

走向统一的自然力

天上力与地上力的统一（Ⅲ）

厉光烈 黄艳华

3. 天上力与地上力的统一

在前人工作的基础上，牛顿对天上星星运动和地上物体运动的规律进行了总结，提出了运动三定律，建立了经典力学，并在开普勒三定律的启发下发现了万有引力定律，指出星星的圆周运动起因于相互吸引；物体自由下落也是因为物体与地球相互吸引，从而统一了天上力和地上力。

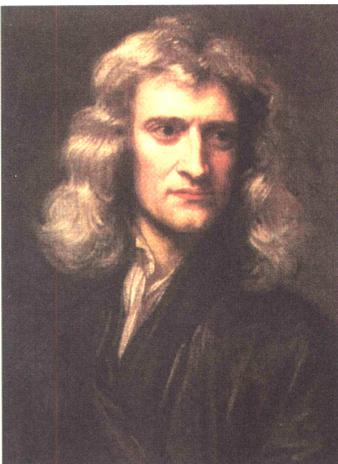
牛顿及其运动三定律

伽利略过世那一年的圣诞节，牛顿（Isaac Newton，1642～1727）诞生在英国林肯郡伍尔索普村。他是一个遗腹子，父亲在他出生前3个月就去世了，母亲在他3岁时改嫁，外祖父母抚养他长大。童年的经历让牛顿养成了孤僻、倔

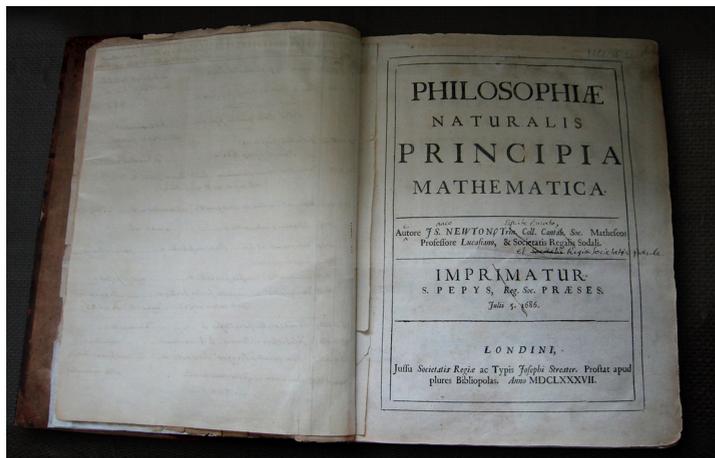
强和不善与人交往的性格，同时也养成了双手灵巧、善于思考的习惯。他18岁进入剑桥大学三一学院，起初想学数学，在三年级时有幸遇到博学多才的数学讲座教授巴罗，在他的指导下，广泛阅读数学、物理、天文和哲学方面的书籍，并动手做实验。1665年初，即将大学毕业的牛顿发现并证明了二项式定理。这个定理在数学、物理学甚至生物遗传学中都有广泛的应用，可以说，即使牛顿一生中没有任何其他的成就，这个定理也足以使他名垂史册。但是，就在他准备从事新数学的创造时，英国暴发大规模鼠疫，大学被迫停课，牛顿回到家乡与母亲同住，一呆就是18个月。避居乡下的这一年多时间是牛顿创造力最旺盛的时期：牛顿运动三定律、

万有引力定律、微积分和色彩理论等重要研究成果几乎都是在这段时间里构思而成的。正因为此，1666年在历史上被称为“牛顿奇迹年”或“科学奇迹年”。1667年，牛顿重返剑桥，他的出色工作备受巴罗教授推崇。两年后，巴罗主动让贤，举荐牛顿接替自己担任卢卡斯教授。

牛顿一生治学严谨，从不轻易发表论文。他在1665～1666年间的重大发现，当时都没有发表，直到18年后，才在好友、著名天文学家哈雷（Edmond Halley，1656～1742）的敦促和资助下，将20多年的研究成果总结成《自然哲学的数学原理》（以下简称《原理》）一书出版。《原理》这部巨著不仅总结了力学研究成果，建立



牛顿



1687年第一版的《原理》

了经典力学体系，而且为后来的工业革命奠定了科学基础。它是牛顿创造性研究的结晶，也是天文学、数学和力学历史发展的产物，是物理学发展史上的第一次大综合。

在《原理》一书中，牛顿首先给出了质量、动量、惯性、力和向心力等力学量的定义：

定义1：“物质的量是物质的度量，可由其密度和体积共同求出”，“此后我不论在何处提到物质的量或质量这一名称，指的就是这个量。从每一物体的重量可推知这个量，因为它正比于重量。”牛顿在这里把质量和重量明确地区分开来，认为质量是物质的固有属性，而重量则决定于在一定位置所受地球的吸引力。

定义2：“运动的量是运动的度量，可由速度和物质的量共同求出。”“物体的运动是所有部分运动的总和。因此，速度相等而物质量加倍的物体，其运动量加倍；若其速度也加倍，则运动量加到四倍。”这里“运动的量”或随后提到的“运动量”就是我们现在所说的动量，它等于质量与速度的乘积。

定义3：“惰力（vis insita），或物质固有的力，是一种起抵抗作用的力，它存在于每一物体当中，大小与该物体相当，并使该物体保持现有状态，或是静止，或是匀速直线运动。”“这个力总是正比于物体，它来自于物体的惯性，与之没有什么区别，……”。实际上，它就是前面提到的“冲力”，在这里牛顿正式将其定义为“惯性”，以区别于下面定义4中的“外力”。

定义4：“外力是一种对物体的推动作用，使其改变静止的或匀速直线运动的状态。”“这种力只存在于作用之时，作用消失后并不存留于物体中，因为物体只靠其惯性维持它所获得的状态。”显见，牛顿对运动与力的关系的看法与亚里士多德明显不同。

定义5~8：都与向心力有关。其中，定义5为“向心力使物体受到指向一个中心点的吸引、或排斥或任何倾向于该点的作用。”接着，牛顿对向心力作了进一步的阐述：

“属于这种力的有重力，它使物体倾向于落向地球中心；……以及那种使得行星不断偏离直线运动而沿曲线轨道环行运动的力”，“系于投石器上旋转的石块，企图飞离使之旋转的手，这企图张紧投石器，旋转越快，张紧的力越大，一旦将石块放开，它就飞离而去，那种反抗这种企图的力，使投石器不断把石块拉向人手，把石块维持在其环行轨道上，由于它指向轨道的中心（人手），我称为向心力。”

然后，他在“运动的公理或定律”部分给出了运动三定律：

定律I：“每个物体都保持其静止或匀速直线运动的状态，除非有外力作用于它，迫使它改变那个状态。”

定律II：“运动的变化正比于外力，变化的方向沿外力作用的直线方向。”

定律III：“每一种作用都有一个相等的反作用；或者，两个物体间的相互作用总是相等的，而且指向相反。”

这三条定律是经典力学的基础。下面，我们对其稍作解释：

第一定律，即上述的定律I，又称惯性定律。牛顿在他的手稿《惯性定律片段》中写道：“所有那些古人知道第一定律（惯性定律），他们归之于原子在虚空中做直线运动，因为没有阻力，运动极快而永恒。”对此，前面已有介绍，这里就不赘述。应当指出，虽然伽利略和笛卡儿对惯性定律的确立贡献很大，但是真正明确提出惯性定律的是牛顿。他不仅继承了伽利略和笛卡儿的想法，在《原理》中全面地阐述了惯性定律，而且在“定义”部分首次提出了质量的概念并明确指出了质量是描述物体惯性大小的量。现在，质量已经成为物理学中最基本的概念之一。

第二定律，即定律II，又称运动方程。前面曾经提到，亚里士多德认为“较大的力产生成正比的较大速度”，伽利略不同意他的看法，通过斜面实验，发现匀加速运动的加速度与合力成正比，这无疑为牛顿提出第二定律奠定了基础。但是，正如爱因斯坦所指出的：“只有引进质量这一新概念，他（牛顿）才能把力和加速度联系起来。”不过，牛顿当时指的是，外力的作用与动量的变化成正比，这一表述不够完善。直到1750年，欧拉（Leonhard Euler，1707~1783）才正确地指出，应该是外力（ F ）与动量（ mv ）的时间变化率成正比：
$$F \propto \frac{d(mv)}{dt}$$
，这才使外力与加速度真正联系起来。

第三定律，即定律III，又称

作用力与反作用力定律，这是牛顿在研究天体的运动时独创的一条定律。为了比较准确地研究天体的运动与其受力的关系，必须分析多个天体之间的作用力，这就会产生作用力和反作用力问题。牛顿正是为了解决这一问题而提出了第三定律。

牛顿不仅将这三条定律确定为运动的基本规律，还利用上述定义和这三条定律，在《原理》的第一、二和三篇中，对地上物体和流体的运动，以及天上星星的运动进行了系统的研究，建立了完整的经典力学体系，他对力学的创造性贡献也正在于此。在《原理》的第一版序言中，牛顿写道：“理性的力学是一门精确地提出问题并加以演示的科学，旨在研究某种力所产生的运动，以及某种运动所需要的力。”在这里，牛顿给出了力学的明确定义，正因为此，后人常将经典力学称为牛顿力学。

《原理》成书三部曲

受惠更斯（Christiaan Huygens, 1629 ~ 1695）“离心力公式”的启发，当时有不少人知道，从开普勒第三定律出发，可以导出行星绕日运动所受到的中心吸引力应该与距离的平方成反比，但是没人知道，在这种服从平方反比律的中心吸引力的作用下行星的运动轨迹是什么。1684年8月，哈雷专程去剑桥向牛顿请教这个问题，牛顿当即回答：“椭圆，吸引中心在焦点。”哈雷问他是怎样知道的，牛顿回答说：“我计算过。”数周后，哈雷收到了牛顿寄来的后来被

称为《论运动》的一篇论文。在这篇论文里，牛顿讨论了在服从平方反比律的中心吸引力的作用下物体的运动轨迹，并由此导出了开普勒三定律，从而明确地阐述了向心力定律，证明了椭圆轨道的平方反比关系。但是，在这篇论文里，牛顿对力的本质尚未认识清楚。受“冲力理论”的影响，他仍然认为：物体内部的“固有力”使物体维持原来的运动状态，即做匀速直线运动，而外加的强迫力则使物体改变运动状态。实际上，我们在前面已经指出，所谓的“固有力”就是运动物体的动量，即 mv ，与牛顿在第二定律中定义的外力，即 ma ，完全不是一回事。另外，他仍称吸引力为重力，还没有认识到这种吸引力的普遍性，更未提到“万有引力”这个名称。

接着，经过更为深入的思考，牛顿用了八九个月的时间完成了他的第二篇论文：《论物体的运动》。在这篇比《论运动》长10倍的论文里，解决了惯性问题，加深了对吸引力的认识，弥补了前一篇论文的不足。首先，他认识到圆周运动是匀加速运动，与匀加速直线运动一样，都不是惯性运动，并用向心力代替惠更斯的离心力来解释运动物体偏离直线轨道的原因，从而正确地表述了惯性定律。其次，他证明了均匀球体吸引所有的球外物体，其吸引力与球的质量成正比，与该物体到球心的距离的平方成反比，以及可以把均匀球体看成是质量集中在球心；他还指出吸引力是相互的，并且通过三体问题的运算，

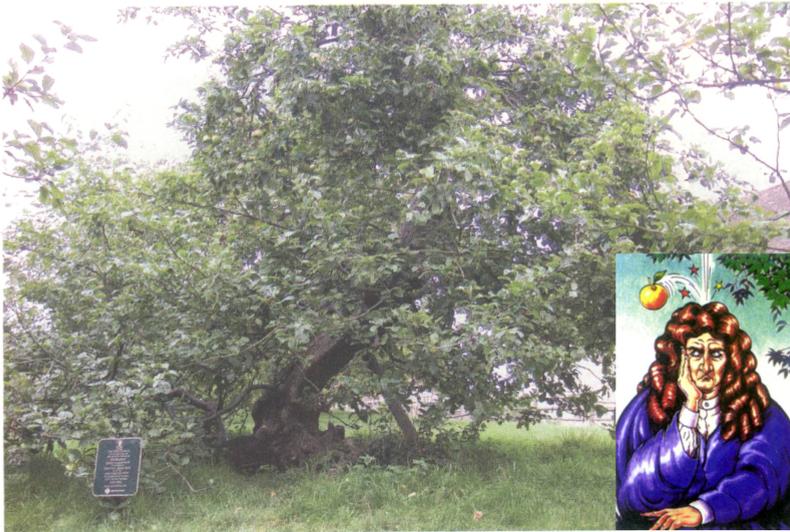
证明了开普勒定律的正确性。第三，他把重力延伸到行星之间，进而推广到任何物体之间，从而明确了吸引力的普遍性。

《论物体的运动》的第二部分，后来取名《论宇宙体系》，并增补了有关彗星运行轨道的内容，成为了《原理》的第三篇。在这一篇里，牛顿仔细地论述了重力作用是使月球囿于其轨道上运行的原因，并由天文现象推演出使物体倾向于太阳和行星的重力，从而全面地阐述了万有引力的思想，我们将在后面对其作更为详细的介绍。《论运动》、《论物体的运动》和《论宇宙体系》是《原理》成书的前奏，也是发现万有引力定律的三部曲。

苹果落地的故事

据传说，牛顿在家乡躲避鼠疫期间，有一次，在苹果树下读书的时候，被掉下的苹果砸中了脑袋，这促使他思考：苹果为什么会“落到地上”而不是“飞向天空”，进而很快发现了万有引力定律。有的书中只提“落到地上”不提“砸到头上”，前者似乎更为合理，但后者却具有戏剧性，容易给青少年留下深刻的印象，因此流传甚广。但是，正是这一“戏剧性”使人怀疑其真实性。那么，究竟是编的故事，还是确有其事呢？

根据有关记载，牛顿生前并没有和别人谈论过这个故事，它是在牛顿去世之后才出现的。最早传播这个故事的就是声名显赫的法国启蒙思想家、文学家伏尔泰，他在1738年出版的《牛顿的哲学》一书中介绍说：1725年，他因政治



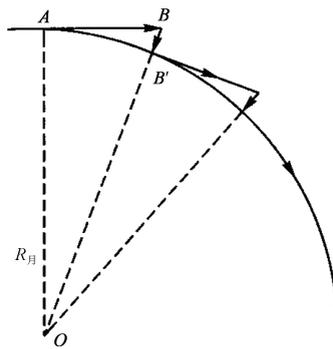
牛顿故居的苹果树

迫害流亡英国，正好碰上牛顿去世，目睹数万伦敦市民为牛顿送葬的壮观场面，深受感动。随后，他拜访了牛顿的亲属，这个故事就是牛顿的外甥女婿告诉他的。牛顿一辈子没有结婚，生活由他的妹妹照料，后来又由他的外甥女照料，牛顿外甥女婿的谈话当然十分重要。他告诉伏尔泰，牛顿生前曾对他讲过这个故事。就这样，“苹果落地的故事”，通过伏尔泰的这部名著从法国传遍整个欧洲，几乎家喻户晓、妇孺皆知。

由于牛顿后半生在争夺发现的优先权上曾与许多人发生争执，因此一些科学史专家认为，苹果落地的故事很可能是牛顿亲属（或牛顿本人）编出来的，以便提前他发现万有引力定律的时间，用来保护他对该定律的发现权。从前面我们已经介绍的《原理》的成书过程以及即将介绍的牛顿思考、发现万有引力定律的过程，不难看出：牛顿确实是万有引力定律的主要发现者。

万有引力定律的发现历程

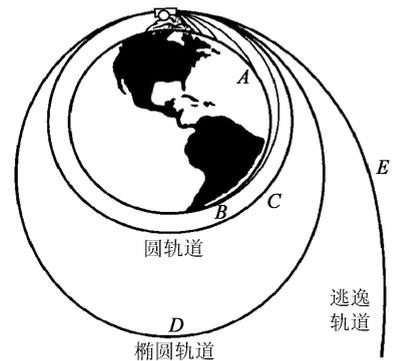
在牛顿晚年时，有人问他是如何发现万有引力定律的，他回答说：“靠不停地思考”。不管“苹果落地的故事”是否确有其事，但是牛顿肯定思考过：月亮这个“大苹果”，为什么不会掉下来？牛顿的过人之处就在于：当大家都认为月亮是不会往下掉的时候，他却看到了月亮正在不断地往下掉，其思路如下：位于下图中圆形轨道 A 点的月亮，其瞬时速度是沿着 A 点的切线方向，也就是说，如果在那一瞬间地球突然消失，那么月亮就将沿 AB 方向直飞出去。然而，由于



不断下落的月亮

地球的存在，有“重力”吸引着它，使它从 B 点下落到 B' 点， B' 点与原来的 A 点离地球中心 O 的距离相等。就这样，如图所示那样重复下去，月亮不断下落的结果是：它沿一个圆形轨道绕地球运动。显然，牛顿将重力从地球表面延伸到月球，成功地解释了“月球为何不掉下来而是围绕地球做圆周运动”。

他的这一想法，通过下图示意的理想实验，得到了进一步的发挥。他设想，一门架在高山上的大炮，沿水平方向，以初速 v_0 射出炮弹。当 v_0 较小时，炮弹都会落到地面上，如图中曲线 A 、 B 所示；当 v_0 大到某一临界速度 v_1 时，炮弹将沿圆形轨道绕地球旋转，变成了一个“小月亮”，不再掉回地面，如图中 C 所示；当 v_0 超过 v_1 且逐渐增大时，炮弹轨道就变为偏心率越来越大的椭圆，如图中 D 所示；更进一步，当 v_0 超过第二个临界值 v_2 时，炮弹便会逃离地球，一去不复返，如图中 E 所示。这里的 v_1 和 v_2 ，现在分别称为“第一宇宙速度”和“第二宇宙速度”，可以算出， v_1 等于 7.9 千米/秒； v_2 等于 11.2 千米/秒。这样，牛顿就将



抛体运动的理想实验

地上炮弹的运动和天上月亮的运动联系起来，同时，他也成功地解释了行星绕日的椭圆轨道。

牛顿清楚地意识到：前面对月亮不断下落所作的几何分析未免太粗糙，应该使 B' 点无限地靠近 A 点，但是，当时的初等数学对这种无限小量的分析完全无能为力。为了解决这一难题，牛顿引入无穷小的概念和求极限的方法来描述连续变化的曲线运动，花了十多年的功夫发明了一种新的数学工具，牛顿称其为“流数法”。所谓“流数”，就是现在所说的变数。牛顿发现“流数”在无限小时间内的变化率是一个有限的数值，例如，物体作变速运动时的瞬时速度 v 就是“流数” s （距离）在无限小时间内的变化率 \dot{s} ，牛顿称 \dot{s} 为“流率”，现在我们称其为导数或者微商。当年牛顿的“流数法”就是现在的微分学，而其反演法便是积分学。现在所说的微积分学以及微分和积分符号，例如 $v = \frac{ds}{dt}$ 和 $s = \int v dt$ ，都是莱布尼茨（Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646 ~ 1716）在牛顿之后独立发明的。正因为此，两人曾就微积分的发明权问题进行过长期激烈的争论。事实上，他们都各自独立地作过贡献。牛顿可能比莱布尼茨发明得早些，但公开发表的时间则晚些，而且严密性和系统性都不如莱布尼茨。另外，牛顿所用的符号，例如 $v = \dot{s}$ ，与莱布尼茨的 $v = \frac{ds}{dt}$ 相比，也略显不便。但是，牛顿在创立“流数法”后，运用这一数学工具深入地探讨了力学问题和天体问题，发

现了万有引力定律，建立了完整的经典力学体系。就微积分学的推广、应用而言，牛顿的贡献是莱布尼茨所不能企及的。因此，在数学史上，牛顿与莱布尼茨被并称为微积分学的创始人。

说到发现的优先权之争，就不能不提到牛顿与胡克（Robert Hooke, 1635 ~ 1703）之间为谁先发现中心吸引力的平方反比律而起的争执。胡克提出，1679年底，他曾在给牛顿的信中谈到：他认为重力是按距离的平方成反比变化的，显然，牛顿后来发现万有引力的平方反比律是受了他的启发。而牛顿则说，早在1666年，他就从开普勒第三定律推出了平方反比律，并认为胡克在信中提出的见解缺乏坚实的基础，所以他一直拒绝承认胡克的功绩。实际上，布里阿德（I. Bulliadus, 1605 ~ 1694）曾在1645年提出一个著名假设：从太阳发出的力，应与离开太阳的距离的平方成反比。开普勒和布里阿德的天文学工作曾启发了牛顿对天文学的兴趣，使他产生了证明布里

阿德的平方反比关系的想法。1676年，牛顿在一封给胡克的信中写道：“如果我看得更远些，那是因为站在巨人的肩上。”鉴于这封信是牛顿与胡克争夺万有引力定律发现的优先权时写的，这句名言有着双重含义：字面意思是，牛顿承认自己的成就与前人（包括哥白尼、伽利略、开普勒和笛卡儿等）有关；言下之意是，他所说的巨人并不包括身材矮小的胡克。

前面多次谈到，从开普勒第三定律可以导出中心吸引力的平方反比律。读者一定很想知道：究竟如何导出？实际上，从开普勒第三定律并不能直接导出中心吸引力的平方反比律，必须先引入向心力的概念，然后才能导出。在《原理》的定义5-8中，牛顿引入了向心力的概念，并在第一篇第二章命题4定理4的推论1中明确地指出：“由于这些弧长正比于物体的速度，向心力正比于速度的平方除以半径。”也就是说，假若行星以速率 v 在半径为 R 的圆形轨道上绕太阳做匀速圆周运动，那么它必定受到一个正



莱布尼兹



胡克

比于 $\frac{v^2}{R}$ 的向心力 F 的作用。这样，两个在半径不同的轨道上以不同的速率绕日做匀速圆周运动的行星所受到的向心力之比便可表示为

$$F_1 : F_2 = \frac{v_1^2}{R_1} : \frac{v_2^2}{R_2} \quad (1)$$

而根据开普勒第三定律，行星绕日运动的周期 T 的平方与轨道半径 R 的立方成正比，即：

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3} \quad (2)$$

于是，利用 $T = \frac{2\pi R}{v}$ ，便可由 (1) 式和 (2) 式导出：

$$F_1 : F_2 = R_2^2 : R_1^2 \quad (3)$$

即向心力，也就是太阳对行星的吸引力，与距离的平方成反比。

鉴于向心力的概念在由开普勒三定律导出中心吸引力的平方反比律方面所起的关键作用，而牛顿在《原理》中给出的向心力又与惠更斯在 1673 年通过研究单摆运动发现的离心力公式十分类似，牛顿与惠更斯也为发现的优先权发生了争执。实际上，开普勒在发现行星

运动三定律之前，就曾于 1596 年提出过关于太阳与行星之间存在吸引作用的想法，随后又提出了物体做圆周运动时会出现离心力的问题。受其启发，牛顿对离（向）心力作了进一步的推导和计算，并把有关内容详尽地写入《原理》中。人们后来在牛顿的手稿中发现，早在 1664 年 1 月 20 日，他就在《算草本》上提出了如何计算物体做圆周运动时所受到的向心力的具体方法。牛顿绕过了力的分析，得到了圆周运动的离（向）心力规律。正因为此，牛顿从不承认他发现向心力公式是受惠更斯的离心力公式的启发。

进一步，在 1676 年和 1677 年间，牛顿从数学上严格证明了，当中心吸引力与距离的平方成反比时，行星将绕吸引力的中心做椭圆轨道运动，并发现从这个中心到行星的矢径所扫过的面积与运动的时间成正比，亦即导出了开普勒第一、二两定律。

最后，我们还得弄清：万有引力的大小与相吸的两物体的质量

有什么关系？运用牛顿第二定律，不难发现，地球对物体的吸引力应与被吸物体的质量成正比，而按照牛顿第三定律，地球对物体的吸引力应与物体对地球的吸引力大小相等、方向相反，也就是说，地球与物体之间的吸引力既应与被吸物体的质量成正比，也应与地球的质量成正比。由此推断，任何两个天体（或物体）间的万有引力的大小都应与此两个天体（或物体）的质量乘积成正比。考虑到前面讨论过的平方反比律，它还应与这两个天体（或物体）之间的距离的平方成反比。这样，著名的万有引力定律的数学形式就大体上确定了，即

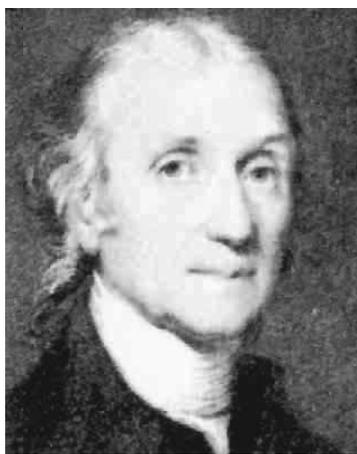
$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

其中 m_1 和 m_2 是两个天体（或物体）的质量， R 是它们之间的距离， G 是万有引力常数。

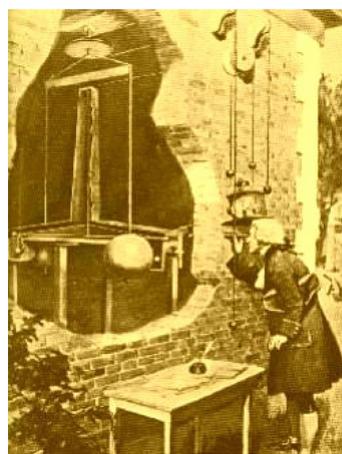
由于地面上两物体之间的引力太弱，所以万有引力常数 G 的测量非常困难。直到 100 多年后，才由英国物理学家卡文迪什 (Henry Cavendish, 1731 ~ 1810) 于 1798



惠更斯



卡文迪什



卡文迪什在做扭秤实验

年通过扭秤实验测得。他当时所测得的值为 $G = 6.754 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ，已经很接近目前国际公认的 G 值： $6.6742 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

实验验证万有引力定律

万有引力定律的发现，不仅成功地解释了已知行星的运动规律，而且准确地预言了彗星的轨道和运行的周期，哈雷彗星的发现就是一个最好的例证。

1682年，一颗明亮的彗星出现在天空。哈雷在《原理》出版之后应用牛顿发现的运动三定律和万有引力定律，计算出这颗彗星的运行周期约为76年，从而证实历史上多次出现的大彗星原来是同一颗彗星。他还预言，这颗彗星76年后将再次出现。76年后，当这颗彗星再次照耀地球的时候，万有引力定律得到了举世公认。那一年，哈雷已经去世十多年了，为了纪念他，人们将这颗彗星命名为哈雷彗星。

大约150年后，人们发现，



哈雷

天王星的实际轨道与万有引力定律所给出的明显不符，万有引力定律再次经受了考验。观测表明，天王星的运行轨道很不规则，即使计入比它更接近太阳的各个大行星（木星、土星等）对它的摄动，仍然无法得到解释。难道万有引力定律有问题吗？当时，两位年轻人：英国的亚当斯（J. C. Adams, 1819~1892）和法国的勒威耶（U. J. J. Le Verrier, 1811~1877），都猜测这可能是由位于天王星之外的一颗未知行星的摄动引起的。他们利用万有引力定律进行了非常复杂的计算，各自独立地得到了未知行星的轨道。1846年，亚当斯首先写信给英国格林尼治天文台，指出该行星的位置，请他们观测。天文台的专家们觉得亚当斯是个不知名的青年人，没有重视他的请求，把事情延误了。几个月后，勒威耶独立发表了类似的计算，指出的未知行星位置与亚当斯的相仿。在看到勒威耶发表的论文后，英国天文台想起了亚当斯的信，于是他们开始



哈雷彗星



勒威耶



亚当斯

着手准备观测。正当他们慢吞吞磨蹭时，勒威耶把自己的计算结果寄给了柏林天文台。勒威耶当时并不知道亚当斯的工作，但他急于知道自己的预言是否正确。在接到勒威耶信的当天晚上，柏林天文台台长手边正好有一份合适的星图，他立刻就去看。在勒威耶预言的位置附近，他找到了这颗行星，它就是我们现在所说的海王星！英国格林尼治天文台听说后，赶快按亚当斯所说的位置去找，当然他们也看到了这颗新行星。海王星的发现，常被戏称为“笔尖上的发现”，它再次验证了万有引力定律准确无误。

天上力与地上力的统一

在《原理》的第一版序言中，牛顿写道：“我的这部著作论述哲学的数学原理，因为哲学的全部困难在于：由运动现象去研究自然力，再由这些力去推演其他现象。”正是在这部著作中，牛顿给出了力的定义，并正确地建立了运动与力的关系，进而开始了对自然力，特别是重力的研究。

前面曾经提到：亚里士多德把运动分成自然运动和强迫运动。他认为，自由落体运动是自然运动而不是强迫运动，因此与力无关。虽然他也提到，物体越重，下落速度越大，也就是说，自由落体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。后来，伽利略通过实验证明，水平抛出的石头，之所以偏离直线路径而沿抛物线运动，是因为它受到地球的吸引，也就是受到指向地球的重力的作用。但是，正像罗杰·科茨在《原理》的第二版序言中所指出的：“在牛顿之前虽曾有人猜测或想象，所有物体都受到重力的作用，但唯有他是第一位由现象证实重力存在的科学家，并使之成为他最杰出的推理的坚实基础”。牛顿不仅研究地球表面附近物体的重力特性，指出“与所有物体被引向地球一样，地球也为所有的物体所吸引，重力作用是相互的、对等的”，而且将其从地球表面延伸到月球、行星和太阳，乃至宇宙万物，最终发现了万有引力定律。

作为关键的一步，牛顿通过思考：月亮这个“大苹果”为什么不掉下来？引入了向心力的概念，

进而从开普勒三定律导出“中心吸引力的平方反比律”，并计算得到了行星绕日的椭圆轨道；牛顿还通过数学推理和具体计算，证明了沿轨道运行的月球的向心力与地球表面的重力之比等于地球半径的平方与月球轨道半径的平方之比，也就是说，使月球停留在其轨道上的向心力，正是地球延伸到月球的重力，这足以使人们相信这种力能延伸到极远的距离。牛顿进一步指出：既然就我们所能做的与之有关的任何实验或观测而言，一切物体，不论其在地上或天上，都有重量，那么我们必须肯定引力普遍存在于一切物体中，从而发现了“万有引力”。这样，牛顿就把导致地上物体自由下落的重力和引起天上星星运动的引力联系起来，实现了“天上力”与“地上力”的统一，这大大加强了“自然界规律应该统一”的信念，在科学史上具有特别重要的意义。

在伽利略和牛顿之前，人们一直认为天上世界存在着月球、行星和太阳等，这些天体基本上只有一种运动，即圆周运动，而地上的物体，受到力的作用可以做不同的运动，天上的世界与地上的世界是完全不同的两个世界。因此，人们认为支配“天上世界”和“地上世界”的也应该是完全不同的运动法则。然而，牛顿却使我们相信：地上的世界和天上的世界受到相同的物理规律的支配。《原理》所描述的经典力学，包括运动三定律和万有引力定律，就是用来说明受力物体（或天体）将如何运动的物理理论，它是人类掌握的第一个完整的

科学理论体系，或称科学宇宙观，其影响所及遍布经典自然科学的所有领域。《原理》达到的理论高度是前所未有的，其后也不多见。爱因斯坦说：“至今还没有可能用一个同样无所不包的统一概念，来代替牛顿的关于宇宙的统一概念。要是没有牛顿的明晰的体系，我们到现在为止所取得的收获就会成为不可能。”

牛顿生活的年代，古希腊的自然哲学开始同意大利、英国和法国的实验科学相结合，正是这个伟大的时代造就了牛顿这位历史上最伟大的科学家。他承前启后，将开普勒对天上星星运动的研究和伽利略对地上物体运动的研究融合在一起，实现了天上力和地上力的统一，建立了完整的经典力学体系。直到今天，飞船升天，遨游太空，发射依据的仍然是牛顿的运动三定律和万有引力定律，可见，经典力学威力之大，其作用历经数百年而不衰。可是，牛顿在他的遗言中却说：“我不知道世界会怎样看待我，但我认为自己不过像个在海滩上玩耍的男孩，不时地寻找到一些较光滑的卵石和漂亮的贝壳，并以此为乐，而对于摆在我面前的真理的汪洋大海，竟还一无所知。”联想到精确宇宙学最近发现：人类已经有所认识的重子物质只占宇宙物质总量的4%，而对占96%的“暗能量”和非重子暗物质仍然一无所知，这不能不使我们对牛顿的远见卓识和宽广胸襟佩服得五体投地。

（中国科学院高能物理研究所 100049）