

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中小學生課堂故事博覽

星光灿烂铸经典

— 运动学的故事



“力”字探源

众所周知，力学中出现频率最高的是“力”字。古人对于力作用现象的粗浅观察，大多是文字记载的。文字是人类用来记录和传达语言的书写符号，其实文字也是人类认识自然和改造自然的最好见证。

在揣摩、研究“力”字的过程中，我国一位专攻中国古代物理学史的学者，通过搜集各方面资料，从甲骨文中获得了一项发现。

原来，甲骨文的“力”字写作，表示像耒（lǐ 音磊，古代的一种农具，形状像木叉）那样的尖状起土农具。将一根削成尖状的木棒插入土中，把泥土翻起，这种劳动需要人的体力。甲骨文的“男”字写作，意思是用力耕田。

因此，这位学者认为，甲骨文的“力”字，可以看作是我国古代人认识力的最早见证，当然这里记载的是体力。而“男”字的造型，反映了当时像耕耘、种植这样的体力劳动是男子的职责。由此可见，“力”字至少出现在公元前 13 世纪。

与文字记载探源有关的便是古籍的发掘。要在浩如烟海的古籍中进行发掘也不是一件易事。但经过许多学者的研究，一致认为《墨经》是我国最早的一部物理学的古典文献，其中包含许多有关力学的文字。

墨家的创始人是墨翟，又称墨子，既是著名的思想家、哲学家，又是古代一位少有的对物理知识有重要贡献的人物。墨子一生勤于钻研，热心于对自然的研究，最喜欢“摹万物之然”，于是在他的著作《墨经》中，对发现力的事实又作了进一步的记载。

《墨经》载：“力，刑之所以奋也。”这里的“刑”同“形”，指物体。“奋”的原意是鸟张大翅膀从田野里飞起。而要指出的是，“奋”字在古籍中有多方面的含义，像由静而动，动到愈速，由下上升等都可以用“奋”字。所以上述记载的意思是：力是使物体由静而动、动而愈速或由下而上的原因。

《墨经》这一条“说”还指出：“力：重之谓。下，與。重奋也。”这是对力的进一步阐述。

虽然一个物体在力的作用下会改变运动的状态（包括由静而动），但力是不容易被人看见的，所以往往要通过物体的“重”（即重量）来表现。“谓”指表达，因有重量的报告，才知力的多少强弱。

在墨家看来，“力”和“重”是相当的。我国古代一直把重量的单位如“钧”、“石”等作为力的量度单位，从一个侧面说明了这一点。再有，以前人们把“力学”称“重学”也源出于此。

“與”有举之意，“下，與。重奋也。”意即物体的下落或上举，凡物有重量可表达的，都是运动的力。

墨家的这条文字符合当时认识水平：人们知道状态的改变需要什么，他们不仅看到鸟从田野奋飞而起的神态，也亲身体验到从下往上把重物举起的过程所必须付出的代价。这条文字也没有超越时代的局限：先秦时期显然没有加速度概念，更不可能将加速度和力联系在一起，人们只能从“奋”、“下”、“與”这些动作或状态改变中，从“重之谓”有关物体重量的报告中，去寻找力的原因。

当然，墨家上述力的定义限于当时的历史条件，表达还不那么精确。但是远在 2000 多年以前，以墨翟为首的墨家能从实际的细致观察中，给出力的

这种意味深长，比较正确的定义，确是难能可贵的。应该说是达到了当时认识自然的一个高峰，是一项相当了不起的发现。

自然界中的四种基本力

力——一个笔划简单的单词。人们通常把它理解为一个物体对另一个物体的作用，它是人们最熟悉的一个物理概念。但是人们可曾想到，它乃是自然界中最大的一个难解之谜。毫不夸张地说，就是最权威的物理学家，也没有本领把自然力中的任何一种说得一清二楚。人类开始科学地、系统地认识自然力，已经有三百多年的历史了。人们在认识自然力的征途上的每一项重大突破，都会在科学上爆发一场重大革命，给人类的物质文明和精神文明带来深远的、不可估量的影响。

如果我们把宇宙比作一座时钟，那么自然力就是驱动这座时钟运转的发条，推动着宇宙的演化和发展。那么，下面就让我们从大家最熟悉的一种自然力——引力说起吧！

引力

开普勒的贡献

哥白尼的太阳中心说，是 16 世纪科学史上最伟大的成就。近代科学革命，正是以此为开端的。不过，这场革命开始时，规模还是很小的，而且不时地遭到中世纪反动教会势力野蛮的袭击。直到 17 世纪，自然科学还不过是一颗刚出土的嫩芽。

意大利勇敢的天文学家布鲁诺，坚持哥白尼的太阳中心说观点，反动教会斥责他是异教徒。1600 年 3 月 17 日，他被活活烧死在罗马的百花广场上。

但科学从不是软弱无能的，近代科学革命面对反动势力的挑战，依然在黑暗中传播、发展。

天文学家开普勒的老师——丹麦天文学家第谷·布拉赫也信奉地球中心说，开普勒继承师命，想从他的老师遗留下来的资料中找出科学依据，来证明哥白尼的日心说是错误的。然而，他凑来凑去，观测到的数据与地心说总是不能吻合。终于，撇开地心说的念头在他脑海中产生了。他想，如果按哥白尼日心说计算，结果会如何呢？他计算了一下，同观测到的情况有点接近了，可依然不理想。

经过数年的埋头钻研，开普勒终于得出了正确的结论：地球确实和其它行星一样，在不停地绕太阳运行；但这个轨道并不是圆的，而是一个比圆复杂的椭圆。太阳也并不位于中心位置，而是处于椭圆的一个焦点上。

1609 年，开普勒发表了关于行星运动的两条定律。一条是：每一颗行星总是沿着一条椭圆轨道环绕太阳转，太阳则处在椭圆的一个焦点上；另一条是：从太阳到行星所连接的直线，在相等的时间内扫过同等的面积。9 年之后，他又发现了第三条定律：行星绕太阳一圈的时间的平方和行星各自离太阳的平均距离的立方成正比。这就是著名的开普勒行星运动三大定律。

由于开普勒的贡献，哥白尼的太阳中心说有了进一步的发展。太阳系诸行星的秩序终于澄清了。此后，天体之间的运动更吸引着人们的注意，到底是什么原因驱使着行星不知疲倦地绕太阳作规则的椭圆运动呢？也许有某种力作用于行星吧！

伽利略的实验

在意大利的比萨城，有一座高塔。由于设计师的疏忽，塔建成不久，因一侧地基下沉，塔身便倾斜了。不过由于塔身坚固，这个塔并没有倒塌。

这座斜塔记下了一项十分珍贵的科学实验，这就是 16 世纪末比萨大学一个青年讲师伽利略的重力加速度实验。

伽利略以前的人，对重力加速度几乎一无所知，他们相信书本上记载的亚里士多德的信条：同样大小的物体，其坠落速度和它的密度成正比。物体愈重，坠落得愈快。伽利略不相信这种结论是正确的。据说，他拿了两只形状和大小都一样的铅球和石头，登上比萨斜塔的顶部。他举起双手，同时将两物体松开。两物体越来越快地往下坠落，最后铅球和石头同时落到了地面。

为了搞清物体下落的规律，伽利略做了许多实验。他让一只金属小球从光滑的斜面上滚下来，此时，小球滚下的情形和自由下落的情形十分相似，

只是速度慢得多。伽利略用了一只简单的水钟，记录下了小球滚下的路程。伽利略从多次的记录中发现，一个物体从高处下落的速度，会随着下落的时间越来越快，并把这个规律用精确的数学公式表示了出来。

是什么原因促使物体以越来越快的速度坠向地面呢？伽利略对此也曾猜想过：这可能是地球对物体的引力吧！

牛顿的发现

依萨克·牛顿，1642年生于英格兰乌尔索普小村的农民家庭，父亲在他出世之前就去世了。三年后，母亲又改嫁，被继父带往新居。牛顿从此由外婆来照料，并进到乌尔索普村立小学接受教育。14岁那年，牛顿的继父又去世，母亲带着三个儿女，回到乌尔索普农家，过着更为贫寒的生活，幸而牛顿的舅父安斯考对这位少年人很有兴趣，帮助牛顿进到了格蓝珊公立中学，后来又帮助他考进了剑桥大学三一学院，这就是牛顿一生事业的开始。

1665年的牛顿犹如一粒成熟的种子，开始吐芽，预示着科学上就要开出灿烂的花朵。这时，已经有几个重大的问题在牛顿的脑海中盘旋：是什么原因约束着一颗巨大的行星如此规则地沿着椭圆轨道绕太阳旋转？又是什么原因使物体以越来越快的速度坠地？这两者之间存在着联系吗？这三个问题的提出，本身就是一个了不起的成就。科学上的重大发现，往往是把两个表面上看来几乎完全无关的事件联系在一起后才完成的。

据说，牛顿在乌尔索普家中的苹果园，看到一只苹果落地，从而联想到引力的问题。苹果以越来越快的速度落向地面，是由于地球对苹果吸引力的缘故。地球既然对苹果有吸引力，那么它为什么不可以对月球有吸引力呢？正是这个力起到了一根无形的绳子作用，迫使行星绕太阳旋转，也迫使月亮绕地球旋转。

牛顿是个数学上很精通的天才，到了1685年，他在科学上更加成熟了。那时，他不但搞清了地球的正确半径，还掌握了力、加速度和物体重量的关系。特别是他证明了：一个具有引力的物质组成的球吸引它外边的物体时，就好像所有的质量都集中在它的中心一样。把太阳、行星、月球都当作一个质点看待的简化计算方法显然合理。这就把粗略的近似计算提高到了极其精密的证明。万有引力的正确表达公式，终于在牛顿手中得到了。

万有引力定律的表述是：两个物体彼此以力在相互吸引着，力的大小和两个物体的质量的乘积成正比，与两者之间的距离的平方成反比，公式的形式是：

$$F = G \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2}$$

式中 M_1 、 M_2 表示相互吸引的两个物体的质量； R 表示两物体之间的距离， G 表示引力常数。

万有引力定律，把天体间的力和地上的引力的联系建立起来了。牛顿写到：“如果我们设想抛射体的运动情况，就可以很容易地理解到为什么行星可以保持在某条轨道上：因为一粒水平射出的石子，由于它本身的重量（地球对它的引力），使它不得不离开直线轨迹……，并在空中描出一条曲线，最后落到地面上；射出的速度愈快，它的射程越远。所以我们设想石子的速度增加得非常之大，以致射程越过了地球的界限，从地球上擦过去了。”月

球和今天的人造地球卫星，正是牛顿所描述的这种情景。

爱因斯坦的创造

自从牛顿发现万有引力定律之后，大约有二百多年的时间，人们对引力的认识再没有什么实质性的进展。直到本世纪初，牛顿的经典引力理论，才由德国一位青年物理学家阿尔伯特·爱因斯坦把它大大地向前推进了一步。

1879年3月14日，爱因斯坦生于德国的乌尔姆城，父亲和母亲都是犹太人，出生次年，全家移居慕尼黑，在那里度过了他的少年时代。15岁那年，爱因斯坦的父亲因经营工厂失败，家庭移居意大利的米兰。爱因斯坦继续留在慕尼黑中学读书，开始了他的独立生活。16岁那年，爱因斯坦为谋求一个职业，去苏黎世报考瑞士联邦理工大学，不幸落选。他毫不灰心，经过一年的勤奋备考后，次年终于如愿了。大学时代的爱因斯坦，与中学生时代的嗜好一样，依然是不倦地钻研着一大堆同课程无关的书籍，其中有基尔霍夫、赫姆霍兹、赫兹、玻尔兹曼等人的物理名著，还有一些乱七八糟的哲学书籍。就在他的大学年代，以太、时间、空间、电磁场……，这样一些物理学中的基本概念，成了爱因斯坦经常思考的问题。

1900年，爱因斯坦大学毕业，只因为他是犹太人，没有瑞士国籍，使他足足有两年没有找到固定的工作。生活贫困，慢性病的折磨，终未能减低他对理论物理的极大兴趣。1901年，22岁的爱因斯坦在德国《物理学年鉴》上发表了他的第一篇科学论文。次年，在他的亲密同学格罗斯曼的父亲帮助下，好不容易在伯尔尼瑞士联邦专利局找到了工作。他在每天应付那烦琐的事务工作之余，继续开展理论物理的研究。在这些看来最平常不过的年代里，却是爱因斯坦科学生涯中最富有创造性年代。

1905年，是爱因斯坦在这些创造性年代中所做出最为伟大贡献的一年。在这一年，他连续发表了几篇震惊世界的论文。其中，《论动体的电动力学》一文，是爱因斯坦多年探索的结果，这篇狭义相对论的论文，以其完整的形式，提出了等速运动下的相对性理论和空间的新概念，从根本上动摇了作为物理学基础的牛顿力学关于绝对空间和绝对时间的观念，引起了物理学理论基础的重大改革。

1905年的巨大成就，使爱因斯坦从一个专利局的小职员跨入了第一流物理学家的行列。爱因斯坦并没有因这些成就而停止他探索自然的脚步。1908年以后，他又开始了一个更为艰巨的课题的研究：牛顿的引力质量是什么？怎样才能把牛顿的引力同狭义相对论融合起来？他一个人埋头钻研，前后花了7年心血。终于彻底改造了牛顿的万有引力理论，创立了广义相对论。

爱因斯坦想，倘若有一人站在可以自由升降的电梯里面，如果没有地球的引力，电梯加速上升，而且这个加速度正好等于重力加速度。那么，电梯里的人一定以为，他是处在一个正常的地球引力场中。可这时，电梯内的重力感觉，恰恰是由于电梯加速上升的惯性引起的。爱因斯坦因此斩钉截铁地作出结论：这两种力没有区别。爱因斯坦从这件事得到启发，也许引力场和一个非惯性系统（升降梯的加速运动）之间，在一定范围内是等价的。下一步，便是如何用数学形式把这个重要的等价原理恰如其分地表现出来。苦战7年，当爱因斯坦找到了黎曼几何（非欧几里德几何）的数学形式之后，才用它建立起了一种崭新的理论——广义相对论。从广义相对论的角度看，

物体之所以落到地面，是因为地球周围的空间是弯曲的。

为了说明这个抽象的概念，我们可用一个平面的例子来说明。尽管具体情况要复杂得多；但其基本精神还是一致的。如果一只智慧的动物，生活在一平面上。它要从平面上的 A 点到达 B 点。路程最短的方案，便是连结 A、B 之间的直线，如果在 A、B 之间放一块石头，把平面压凹下去，但 A、B 之间的位置不能发生变化。这时，动物从 A 点到 B 点的最短路程就不是直线了。我们把最短路线不是直线的空间叫做弯曲空间。如果在这个弯曲空间的 A、B 两点各放一只小球，小球将会自然地往石头压弯的地带滚去，这就像地球上空的物体，在引力作用下坠向地面一般。

在广义相对论看来，物体在引力场中的种种行为，正是由于它所处的空间，受到质量的影响而发生的弯曲所造成的。它再不是牛顿提出的那个引力传递不需要费时间的超距作用。弯曲的时空，是本世纪 20 年代的一个震惊世界的出色理论。

广义相对论是人类智慧杰出成就的标志之一，是现代物理学的一大支柱。它为人类探索引力的本质提供了理论基础。

电磁力

库仑定律

人们很早就对静电现象有所了解，我国古代就有着“琥珀拾芥”的静电知识记载。

电力与引力不同，它有正、负两种。大小相等、性质相反的电荷可以彼此抵消。世界上一切不带电的物体，全是等量正负电荷的组合体。

最早探索静电力规律的，是 18 世纪一位军事工程师查理·库仑。库仑早年在西印度群岛服役 9 年，后因病退伍回家，这位工程师喜欢自己动手，擅长制作简单的仪器。

1777 年，他发明了一种用细金属丝制成的扭秤，想用来测量以前无法测量的力。静电力到底服从什么规律？便是库仑测量的主要内容。这个实验，方法很简单。将电荷 Q1 放在左边，右边用细金属丝悬挂一个摆，带电荷 Q2。Q1 和 Q2 同性则相斥，异性则相吸。这时，Q2 所受到的吸引力就跟一个钟摆受到地球的引力一样。大家知道，摆的周期与所受的力的平方根成反比：

$$\text{周期} = \frac{\text{常数}}{\sqrt{F}}$$

根据这个原理，通过测量周期，就可以决定出这个力的大小。

从 1784 年开始，库仑在法国皇家科学院备忘录中，发表了一系列有关静电力测量结果的论文。他从许多数据中，归纳出静电规律：两个质点分别带电荷 Q1、Q2，距离为 R，那么，它们之间的作用力跟它们的电荷量的乘积成正比，跟它们的距离的平方成反比。其公式为：

$$F = K \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2}$$

这就是人们认识电磁力的第一个基本定律——库仑定律。式中 K 表示一定量纲的比例常数，其值在真空中为 8.987×10^9 牛顿·米²/库仑²

不难看出，这个公式和万有引力公式十分相似，所不同的是，引力总是相互吸引，静电力却有正有负，表现为力有引有斥，再就是在强度上差异甚大，静电力要比引力强 10^{36} 倍。

现在，我们来思考一个问题，为什么氢原子核外面只有一个电子呢？原来，这里就是库仑定律的规矩，大家熟悉，电场的强弱可以用电力线的疏密来描写。我们把穿过某一面积的电力线条数称为电通量。根据电力与距离平方成反比的库仑定律可以证明，对于一个包量等量正、负电荷体系的闭曲面，穿过它的电通量为零。也就是说，这种体系不可能把静电力漏到很远的地方去，从电学的性质讲，它是稳定的。氢原子的原子核中只有一个带正电的质子，所以外面只有一个带负电的电子才能组成稳态结构。其它各种元素无不如此。

倘使自然界的静电规律不符合库仑定律，哪怕是稍微有一点差异，例如，静电力不与距离的平方成反比，而是与距离的 1.9 次方成反比，那将会发生什么情况呢？此时，穿过包围氢原子闭曲面的电通量不再等于零，也就是说，有静电力线（流进闭曲面和流出闭曲面的电力线之差）穿过闭曲面，这说明静电力可以渗透到氢原子外面很远的地方去。大家可想而知，如果氢原子的电性真的发生了这种改变，它将影响到氢原子与其它原子的结合，由氢原子

和氧原子结合的化合物——水的性质，也不知会变成一个什么样子？它显然再不会具有今天人们所熟知的性质了。所幸的是，这一切都不是真的，世界被库仑定律“统治”着，使我们在今天的世界上生活得很好。

法拉第和麦克斯韦

在自然界中，除了电力之外，还有一种和电力十分相似的力——磁力。磁石吸引铁的现象，也早为人们所熟悉。中国古代四大发明之一——指南针，便是这种力的应用。

磁力的大小，也是库仑通过实验测出的，并由高斯建立了它的定量单位制，故称高斯定律。它与库仑定律、万有引力定律的结构形式几乎没有区别。后来，丹麦物理学家奥斯特发现了电与磁之间的联系。他证明一根通电的导线，会绕着磁极旋转；反之，一个磁铁也有绕一根固定的导线旋转的趋势。1825年，又有一位法国科学家安培，发现了电磁学的第三个基本定律——安培定律。他证明，通有电流的圆形圈，就像普通的磁铁那样，有吸引和排斥作用。根据这一发现，他认为磁体的微粒中，存在着很小的圆形电流。如果这些微粒的电流都在同一方向流动，即产生磁力。

19世纪前期，由于科学家们的努力，人类对电力知识的认识有了很大的进步。但是，对电力和磁力的最关键性的研究工作，是由法拉第和麦克斯韦来完成的。

在一些伟大科学家的经历中，很少有像米哈依尔·法拉第那样动人的。他不是名门子弟，也没有受过正规的中等教育，更谈不上念大学。他靠自己的勤奋好学和对自然科学的酷爱，更由于遇到了伯乐式的良师戴维，终于登上了科学的高峰。

19世纪20年代，法拉第在自己的研究笔记中，写着这样一句话：“把磁变为电”。这句话的分量，以及以后被他的实验所证实的伟大意义，是他自己当时怎么也估量不到的。在探索把磁变为电的道路上，开头几年，法拉第也屡遭失败，无论怎样调弄仪器，都无法用一块磁铁来产生电流，也无法用恒定电流通过线圈时产生的磁来形成电流。时间一年一年地过去，法拉第也在不间断地探索。1831年的一天，发生了这样一件偶然的事：当连接电池的开关突然断开的一瞬间，电流计的指针忽然偏转了一下。法拉第所追求的正是这一现象，这件事当然引起他的注意。他紧紧地抓住这个线索，反复地做了许多实验，终于发现了磁也能产生电力，条件是这个磁必须是动的。

发现了动磁产生电力之后，法拉第又非常形象地描写了电力和磁力是怎样从一个物体传递到另一个物体的。为了对这个现象进行解释，他引入了一个非常重要的概念——场。他认为，任何一个带电体，周围都存在着电场，任何一块磁铁的周围，也存在着磁场。电场和磁场就是电力和磁力的传递者。

但是，电场与磁场之间到底有什么关系呢？在19世纪前半半个世纪中，物理学家们一直在思考着这个问题。正确解答出这个问题的是英国另一位杰出的物理学家詹姆斯·麦克斯韦。

从1854年开始，麦克斯韦就致力于研究有关电力和磁力的理论。麦克斯韦的研究方向一开始就是很明确的。他要把法拉第等人的一些物理想法写成定量的数学公式。他对法拉第的贡献非常敬佩，整天研读法拉第的实验报告。经过多年的研究之后，麦克斯韦发现当他把四个定律的数学方程式表达出来

之后，发现这些公式与他想达到的目的并不相容，彼此矛盾，不能统一电磁力。为了克服这个困难，麦克斯韦在电磁规律上加上一项电场随时间的变化。于是，整个方程就变得相容了，而且不违反法拉第和安培定律。

物理学发展到这里，标志着人类对电磁力的认识步入了一条新的坦途，也是整个物理学史上一个非常重要的发展。麦克斯韦的方程式告诉我们几个非常重要的结论：

1. 电和磁不可分割地出现在同一组基本方程组中，电力和磁力是统一力；

2. 变化的电场可以引起变化的磁场，变化的磁场又引起新的变化着的电场……，这种电磁场在空间的传播叫电磁波；

3. 电磁波的性质，尤其是它的传播速度和光速完全相等。这一点不能不使人相信，光就是电磁波。

这些结论，是 19 世纪物理学中最伟大的发现之一。

弱力

神秘的射线

1895年，德国的一位物理学家威廉·康德拉·伦琴发现置于真空放电管附近的密封底片，虽然没有暴露在光线下，但却变成了灰色。伦琴断定，放电管内一定存在着能穿透底片的“光线”。他抓住这一现象追踪下去，并将涂有铂氰酸钾磷光质的屏幕，置于放光管附近，屏幕闪闪发光。他又将金属厚片置于放电管和磷光屏中间，屏幕后便出现了金属的阴影。倘使再换上轻质的薄铅片或木片，屏幕几乎看不到这种阴影。当用这种射线来观察人体时，更为神奇的现象发生了：活龙活现的人体在屏幕后除剩下骷髅般的骨骼外，其它的一切都不见了！

无独有偶，继神秘的X射线发现之后，1896年，法国的亨利·贝克勒尔，想起了有一种天然铀盐矿石，经太阳曝晒之后，在暗室中观察，矿石会发出一种浅绿色的荧光。他为了考察新发现的X射线，将一块天然铀盐矿石放在一张用黑纸包起来的照相底片上，打算放在太阳下曝晒，看底片是否也会像X射线那样感光。十分不巧，天气阴雨，贝克勒尔只得把底片连同矿石一起锁在不见光的抽屉里，并无意地在底片上放了一把钥匙，许多天过去了，贝克勒尔灵机一动，不妨把这张底片也冲出来看看。又一桩神奇的现象出现了：底片早已感光了，还呈现出一把钥匙的清晰阴影。进一步考察表明，这种射线是一种新的、穿透力也很强的射线。

1900年，居里夫妇开始有系统地从元素、化合物、天然矿物中寻找这种效应。他们从沥青铀矿和其它几种含铀矿物中，发现了比钠盐更为活跃的元素。居里夫人和贝蒙特合作，从沥青铀矿中制取了放射性元素镭。另几位学者还发现了钋和钷。

这一连串的新奇发现，引起了科学家们的震惊和注意。原来，原子量很大的元素，几乎都具有放射性。经过一段研究之后，人们才弄清了放射出来的射线具有三种不同的成分：一种叫α射线，这是由两个质子和两个中子组成的、质量为氢原子质量四倍的正粒子流；一种是β射线，也就是贝克勒尔发现的射线，它其实就是一种电子流；还有一种射线叫γ射线，这是一种比X射线穿透力还要强得多的射线，它是一种不带电的光子流。

物理学家们开始把注意力集中到原子核内部。那些来自原子核深处的神秘射线显示出：物理学中尚有一块未被开垦的“处女地”。到底是什么力量把α、β、γ射线中的粒子从原子核内部抛出来的呢？直到本世纪30年代，人们对原子核内部有了一个初步了解之后，才发现了支配微观世界规律的，又有一种新的自然力。

费米的弱力理论

从上世纪末开始，人们的视野穿透到了另一个天地——微观世界。人们弄清了原子是由很小的原子核和绕核旋转的电子所组成。随后，人们又弄清了原子核是由带正电的质子和不带电的中子构成的。还搞清了它们之间的一些变化关系：中子发射一个电子就变成质子；质子又可发射一个正电子变成中子。表面看来，人们已弄清了一些新奇的、微观粒子的“换身术”。

中子 质子+电子
质子 中子+正电子

天然的 β 衰变，正是原子核内的中子放出电子，衰变成一个质子的现象。当人们想进一步弄清 β 衰变时，物理学竟在微观领域遇上了一场生死存亡的挑战。按照物理学中最重要的能量守恒定律， β 衰变过程中，原子核内部中子衰变成质子而失去的能量，应该等于它所放出的电子带走的能量。然而，实验结果表明，电子所带走的能量，总比原子核应该放出的能量少得多。直接观测的 β 衰变过程表明，电子具有从零到某一上限的不同动能。这说明原子核所失去的能量并不恒等，有多有少。物理学家们为此提出了种种假设，但都无法解释这桩怪事。

正在这个紧要关头，在玻尔领导的哥本哈根理论物理研究所里，有位大胆的青年物理学家泡利，于 1933 年提出了一个崭新的理论：在微观世界，确实存在着一个“窃能贼”，把原子核内释放的一部分能量偷走了。泡利假设：它可能不带电，质量也非常小，同周围的相互作用力很弱，所以就不知不觉地从测量仪器下溜走了。

恩里科·费米紧紧抓住泡利关于“中微子”的假设，继续向纵深思索：如果中微子真的存在，那么，在原子核里出现的放射性行为，就可以解释为这样一个道理：原子核中的中子在衰变成质子的过程中，不仅是放出一个电子，同时还放出一个中微子。这就是说，前面所讲的那种“换身术”不对，正确的方法应是：

中子 质子+电子+中微子

究竟是一种什么力促使这种变化呢？仔细分析，电磁力不可能产生这个过程，因为电磁力的传递者是光子，而在这种衰变中没有光子参加。费米作了一个大胆的尝试，他假定：从质子到中子的衰变过程，是由于自然界中某种新的力引起的。经过一番琢磨，费米得出了几个新颖奇特的结论：

1. 这个力要比电磁力弱 10^{11} 次方倍，但比万有引力要强得多；
2. 这个力只能发生在四个自旋为二分之一的基本粒子之间；
3. 这个力的作用力程非常短，几乎为零，即参与相互作用的粒子彼此一离开，力就迅速地消失了。

弱力没有本领把任何粒子束缚在一个较复杂的体系中，它只存在于一些粒子发生衰变和俘获的一瞬间，粒子之间一离开，弱力马上就消失。

人们认为自然界果真是存在着一种新的自然力——弱力。费米也因创立了弱力理论而闻名天下，他的理论得到了举世公认。

奇异的 K 介子

继 1956 年发现中微子之后，1957 年人们又弄清了弱力还有一个奇怪的脾气。事情发生在一种叫 K 介子的基本粒子身上。1949 年，科学家第一次在宇宙射线的照片中，看到一种奇异的粒子，四年之后，用强大的加速器又人为地获得了这种粒子，后来把它命名为 K 介子。K 介子有四种，其中两种分别带正、负电荷，记作 K^{\pm} ，另外两种不带电荷，记作 K^0 、 \bar{K}^0 。所以称 K 介子为奇异粒子，其原意是，这类粒子产生的时间非常短，约只有 10^{-24} 秒；但平均寿命则一般在 10^{-10} 秒以上，相对来讲又很长。

说起 K 介子之奇异，还有它另一段很不平凡的经历。1955 年前后，围绕

着奇异的 K 介子，物理学上发生了一桩大疑案，当时物理学家发现有两种 K 介子：一种衰变成两个 π 介子；一种衰变成三个 π 介子。为了区别它们，便将前者命名为 K^+ 介子，后者命名为 K^0 介子。 K^+ 和 K^0 介子除了衰变的差别之外，其它性质几乎一模一样。假如认为 K^+ 介子和 K^0 介子是同一种粒子，只不过具有两种衰变方式，那么，就要动摇现代微观物理学中一条神圣的基本定律——宇称守恒定律。

宇称守恒定律是关于微观粒子体系的运动或变化的、具有左右对称性的定律。微观粒子体系在发生某种变化过程时，如核反应、基本粒子的产生和衰变等，其变化前的总宇称（其值为+1 或-1）必须等于变化后的总宇称。其物理意义是：粒子体系和它的“镜像粒子”体系都遵从同样的运动变化规律。这条定律后来被李政道和杨振宁所打破，证实基本粒子的弱相互作用中，宇称并不守恒。

中间玻色子理论

在已经发现的自然力中，弱力是最独特的一种，费米理论在解释弱作用过程中，尽管得到成功；但他提出：弱力只发生在基本粒子直接接触的一霎那间。很多物理学家不喜欢弱力的这种脾气，他们总是致力于追求大自然的和谐统一。

50 年代末，李政道、费曼和盖尔曼等人，提出了一种新的理论——荷电中间玻色子理论。这种理论的建立，在相当大的程度上是基于电磁理论的启发。从中间玻色子理论来看，弱力和电磁力之间，只要把“电荷”换成“弱荷”，把“电流”换成“弱流”，把传递电磁力的“光子”换成传递弱力的“中间玻色子”，就立即可以得到有关弱力理论的新概念。弱力被描写成交换一种叫中间荷电玻色（这种中间荷电玻色子记作 W^\pm 粒子）的过程，根据测不准关系，作用力的力程与交换的粒子的质量成反比。（测不准关系即一个微观粒子和某些成对的物理不可能同时具有确定的数值，其中一个量愈确定，则另一个量的不确定程度就愈大。）电磁力和引力的作用力程为无限大，被交换的光子和猜想的引力子的质量为零。而弱力的作用力程如此之短（小于 10^{-15} 厘米），那么，被交换的 W^\pm 粒子的质量必然很大。理论计算出这种粒子的质量，约为质子质量的 75 倍，为几十亿电子伏。

正因为中间玻色子太重，现在的高能加速器很难把它产生出来，弱力的中间玻色理论，和费米理论一样，也可以用来解释基本粒子中的弱过程，并且很难区分哪一种理论更好些。

强力

汤川的核力理论

从本世纪开始，物理学家搜集到越来越多的证据，说明原子并非构成我们这个宇宙的最小砖瓦。在原子内部，还有一个微妙而复杂的新世界，在原子的中央，有一个极小的、类似于太阳系中的太阳一般的东西，人们叫它为原子核。原子核的外围，有一些更微小的电子沿着复杂而恒定的轨道，绕原子核不停地高速旋转着，犹如行星绕太阳一般。原子核虽小，可它集中了原子核质量的 99% 以上。原子核的结构是由质子和中子两种粒子组成。物理学家把它们统称为核子，意即构成原子核的粒子。质子带正电荷，中子不带电荷。

那么，究意是什么力把质子和中子紧紧地箍在一起呢？究意是什么力量抵消了质子之间的巨大库仑斥力呢？这个神秘的力量就是原子核中的核力。

直到本世纪 30 年代初，有关核力的问题依然是一个难解之谜。有一个名叫汤川秀树的日本青年，认真研究核力的奥秘。他终于发表了有意义的新见解，随后又为实验所证实，把这个难题之解大大向前推进了一步。

起初汤川想，也许是电子在原子核中起作用吧！电子会像胶水一样，把质子和中子粘合在一起。他花了一年的时间，反复钻研这个问题，最后发现这种想法是错误的。汤川没有因此灰心，他想，既然此路不通，其中必有新的奥妙。屡屡失败，说明以往的习惯想法不足以解决问题，必须从一个全新的角度来考虑核力的起源。

汤川详细地分析了核力的性质之后，发现核力是过去还不曾认识到的、一种全新的自然力。它很强，足以把质子和中子牢牢地紧箍在一起。它的作用范围非常小，只限于原子核这样微小的空间范围内，所以在原子核外面感受不到核力的影响。

汤川紧紧盯住一种新的、未曾被人认识的自然力这一想法，继续探索下去。既然自然力都应该是交换某种量子而传递的，而已知的质子、中子、电子、中微子，都不可能作为传递核力的媒介，那么，这之中很可能隐藏着我们未曾发现的新粒子，在质子和中子之间进行交换，从而引起了胶合核子的作用。

这时，汤川的思想已从过去的失败中变得清晰了。他仿佛已经抓住了解开谜底的钥匙，继续向传递核力的机理思考下去：如果真的存在这种新粒子，那么它将有着怎样的性质呢？为此，他又辛勤地研究了一年光景，他模仿电磁力传递的机理，从数学分析入手，终于在 1935 年得出了物理学上又一个惊人的结论：

传递核力的这种新粒子没有自旋；

它可以带电，也可以不带电，即与电荷无关；

新粒子有质量，其质量大约在 200 ~ 300 个电子质量之间。

汤川为他的预言的这种新粒子取了一个名子，叫“重量子”，因为它与传递电磁力的光子相比，是很重的。后来，人们又把这种粒子叫“介子”，因为它的质量介于质子、中子和电子之间。在 1935 年底的日本数学物理学例会上，汤川宣读了自己的论文：《论基本粒子间的相互作用》。

就在汤川提出介子理论不久，正巧物理学家玻尔来日本访问，他认为汤

川的预言是不可靠的。就在汤川找不到权威物理学家支持自己论点的时候，已经有几位研究宇宙射线的物理学者，捕捉到了这类粒子的踪迹。有一位叫安德森的美国物理学家，观察了好几年宇宙射线穿透物质的性质，1937年，他果然在宇宙射线中发现了一种质量介于电子和质子之间的粒子。消息传开了，物理界极为振奋，看来汤川的理论是正确的。玻尔也以严谨的科学态度给汤川写信致歉。

但是安德森是否真发现了汤川所预言的介子呢？经过仔细分析原来是一场误会。人们本来期待着这种介子能传递核力，可它在核子中穿行根本不理睬千千万万的原子核，而是在经过一段行程之后，本身衰变成电子和中微子，犹如衰变一般。这使汤川的理论面临着严峻的考验。

到了1942年，又有一位支持汤川理论的青年物理学家坂田昌一针对安德森发现的新粒子不传递核力的情况，进一步提出了两种介子的理论：安德森从宇宙射线中发现的新粒子，是几乎不与原子核发生作用的 μ 介子；大自然中一定还存在着一种传递核力的介子。

时间又过去了漫长的五年，一位英国物理学家鲍威尔和他的同事，通过一种核乳胶技术，用气球悬置于大气层上空，侦察到了一种新粒子的径迹。这种粒子的质量为电子的273倍，它与原子核有很强的相互作用，恰好是汤川秀树所预言的粒子。

走过了一条曲折的道路，新的核力理论终于证实了。1949年，汤川秀树获得了诺贝尔物理学奖金。次年，鲍威尔也获得了这一荣誉。新粒子被命名为 π 介子， π 介子起着质子和中子之间交换力的作用。人们还弄清了，10年前发现的 μ 介子是 π 介子衰变后的产物。

盖尔曼的预言

核子并不是仅仅发生在质子和中子之间，有相当多的基本粒子在相互作用时，同样有这种很强的力显示出来，以致“核力”之称也显得词不达意了。于是，物理学家们干脆采用了一个新的名称——强力，受强力作用的粒子，统称为强子。它是重子和介子的统称，占了基本粒子的绝大多数。

物理学家们在研究强力的理论方面碰到了非常大的困难，在研究强力的实验手段方面，困难同样是惊人的，因为强力很强，必须有很高能量的现代加速器，才能获得有关它的详细性质。这种庞大而复杂的设备，只有经济实力相当雄厚的大国，或者是许多国家联合起来才能筹建得起，建设周期也很长。在研究强力理论时，科学家们再也没有现成的宏观理论作向导了。在已知的重子、介子、轻子、光子四大类基本粒子中，听从强力召唤的，只有重子和介子。强力虽然强大，却管不着轻子和光子。强力的力程也很短，约为 10^{-13} 厘米。在宏观世界里，它总是不露声色。到了微观世界，它却一手遮天，统辖着、影响着许多现象和过程。

面对着50年代高能加速器产生的、数量激增的基本粒子，使物理学者们手忙脚乱。应该怎样来对待这些“小家伙”呢？把他们放在什么位置呢？60年代初，敏锐的物理学家立即想到了化学元素周期表。对基本粒子能否像对化学元素那样进行周期分类呢？沿着这一思路，物理学家们发现，对于当时发现的一百多种基本粒子，粒子的质量，粒子的产生、相互作用和衰变等特性，都具有某种规律性。

1962年，在日内瓦的一次讨论会上，年仅31岁的美国加州大学教授盖尔曼，果然拿出了一张基本粒子的“周期表”。他把当时已发现的一百多种基本粒子分门别类，贴切地排列在规定的表格中。他还预言了一种叫 ψ 的粒子。

他的预言引起了美国布鲁海文实验室的斯米欧博士的极大兴趣。那里不仅具有能量很高的加速器，还有一台刚完工的气泡室，具备寻找 ψ 粒子的充分有利条件。斯米欧组织进行了实验的准备工作，114位专家成立的小组，共同参加了寻觅 ψ 粒子的战斗。

经历了一年多的时间，到了1964年1月27日上午，终于传出了胜利的喜悦，在第97025张气泡室的照片上，找到了 ψ 粒子衰变时留下的径迹。盖尔曼的预言获得了证实。

盖尔曼并没有被这一成就冲昏头脑，反而更加沉稳了。他到底还在想什么呢？原来，盖尔曼的那张表还有另外三个重要的位置空着。他在琢磨这三个位置应该由三种比基本粒子更深一个层次的亚粒子来占据。使人难以置信的是，这三种亚粒子，只有分别带有 $2/3$ 、 $+1/3$ 、 $-1/3$ 的单位电荷才能解释他所提出的新理论。他给自己预言的三个亚粒子取了一个一般词典上查不到的绰号——夸克。盖尔曼在这里借用了爱尔兰作家詹姆斯·乔伊斯所著的《芬尼根的彻夜祭》中的一行诗：“如检阅者似的马克王（传说中的中世纪康威尔的国王），三声夸克！”夸克的意思是海鸟的叫声。这里借用了诗中的“三”字，来形容有三种夸克。

盖尔曼在一封信中进一步解释道：“现有的所有强子，都可以用这三种夸克，像积木一样拼凑起来。”

胶子的寻找

1973年，物理学家进行了用中微子来轰击核子的实验。实验结果又发生了一个预料不到的现象：出现了新的“窃能贼。”核子在被轰击的过程中，有一半的动量在反应中“失窃”了。物理学家从中微子偷窃能量的启发中，敏锐地看出问题所在，指出“窃能贼”可能是隐藏在强子里的一种新物质，它很可能与夸克胶合在一起。物理学家们给这种未发现的新粒子取名为——胶子。

1978年，在日本东京召开的国际高能物理会议上，有几位物理学家终于报告说，他们分析了中微子、电子与核子相互作用的实验数据，并经过周密的计算，完全证实了理论上预言的胶子对夸克的作用。

科学家们预言，在电子与正电子对撞时，只要能量足够大，就可以看到产生出来的强子是从三个粒子喷射出来的。这三个粒子中有两个夸克和一个胶子。正巧，1979年4月，在汉堡附近的西德电子同步加速器的实验中心，“佩特拉”正、负电子对撞机启动了。它可提供的最大总能量为380亿电子伏。足以用来观察胶子特有的喷注现象。为了寻找胶子，来自7个国家的三百多位研究人员，组成了几个实验小组，夜以继日地紧张工作着。丁肇中教授领导的，有中国科学院高能物理研究所二十多位科学工作者参加的小组，也是其中之一。

丁肇中教授一向重视探测器，因为它是物理学家的眼睛。他领导的小组，为这项实验特制了一架叫“马克—捷”的大型综合探测器，它由几百件各种

类型的探测器、上千台电子仪器、几百台电子计算机组成。经过近四个月的反复实验和周密观察，他们找到了 446 起有价值的强子事例。在进一步作了大量分析、计算之后，断定这些强子是由两个夸克、一个胶子放出来的，除了丁肇中小组外，其它几个实验小组也发现了胶子存在的类似证据。科学家们找到了胶子存在的证据，意味着人类已开始进入到强子的内部。它标志着理论物理的研究又深入到一个新的层次。

胶子显灵，为人们认识强力的本质开辟了一条新途径，从夸克——胶子的观点看，强力也许是夸克与夸克之间交换胶子的结果，就像电磁力是交换光子，弱力是交换 W^\pm 粒子一样。实验还表明，这种力也有个奇特的脾气：当两个夸克靠得很近时，这个力很弱，当两个夸克离开时，它们之间的力迅速增强。

既然强力是由夸克与夸克之间交换胶子来传递的，那么我们所讲的核力又是怎么回事呢？这个问题物理学家们猜测：它也许是胶子所引起的强力在质子和中子外面的表现吧！

对四种自然力的认识，到此告一段落。但是自然力还有许许多多的不解之谜，等待人类继续探索……

第五种力之谜

在现实生活中，鸡毛和铁块，哪个落得快，答案是清楚的。至于鸡毛为何比铁块下落得慢呢？人们解释说，这是由于地球周围存在着大气圈，鸡毛所受的浮力大于铁块。

如果在真空管中，鸡毛和铁块，哪个落得快，情况就不同了。当然，答案也是清楚的：鸡毛和铁块将同时落到底部。

至此，不同重量的两个物体究竟谁先落地似乎已明白无误了。

然而在 1992 年，匈牙利的劳伦特·冯·富佛斯等在一次实验中发现：不同重量物体的下落时间略有不同。可当时这一发现却未引起人们的重视。

近二十余年来，美国的朗格等对富佛斯的实验重新进行分析，他们发现：鸡毛和铁块的下落速度确实不同，而且鸡毛的下落速度要略大于铁块。请注意，现在是轻物要比重物下落得快，这又是什么原因呢？

朗格根据自己的实验及 1891 年以来有相当可靠程度的七组实验结果认为，在实验室尺度上，牛顿的引力平方反比定律和实验相比有一系统的偏差。这个偏差，可以表示为引力常数随距离的变化。

以后，对大量地球物理实验结果的分析证实了它的存在，并把它归结为存在一种不同于牛顿引力的新力，称之为第五种力。正是由于这种新力的暗中作梗，才使得鸡毛捷足先登。当然，第五种力的提出，毕竟还只是一种假说而已。

为了弄清这种新力的起源，以弗许贝克博士为首的一组美国物理学家，还重新分析了历史上著名的厄缶的质量等价实验。

我们知道，质量有两个定义，一个反映惯性的大小，叫惯性质量，以符号 $m_{\text{惯}}$ 表示，根据的是牛顿第二定律：

$$F = m_{\text{惯}} \cdot a$$

式中， a 为力 F 作用下的物体的加速度。

另一个反映引力的大小，叫引力质量，以符号 $m_{\text{引}}$ 表示，根据的是万有引力定律：

$$F = m_{\text{引}} \cdot \frac{GM}{R^2}$$

式中， G 为引力常数， m 与 R 分别为地球的质量与半径， F 为物体所受地球的引力。

对于地面上的自由落体运动，应有

$$m_{\text{惯}} \cdot = m_{\text{引}} \cdot \frac{GM}{R^2}$$

这两个定义不同的质量，是否有一定的比例关系。通过实验证明，它们之间有严格的比例关系。

最早的证明就是伽利略的自由落体实验，可得：

$$\frac{m_{\text{惯}}}{m_{\text{引}}} = \text{常量}$$

其次，牛顿提出三大运动定律和万有引力定律，也必然碰到两种质量的关系问题。他用不同材料充当单摆的摆锤，进行比较它们的摆动周期的实验，亦可得：

$$\frac{m_{\text{惯}}}{m_{\text{引}}} = \text{常量}$$

但是，从实验方法来说，不论是自由落体实验，还是单摆实验，测量精度都不高。因为这两种实验都是动态的，涉及位置和状态的变化，还会受其它因素，例如，空气阻力的干扰。

于是，匈牙利的厄缶设计了更为精确的质量等价实验。他采用扭秤方法，把动态实验改为静态实验，直接比较两个物体的惯性质量和引力质量，从而大大地提高了实验精度。

一根横杆悬挂在细线下，横杆两端对称地固定着材料不同、但质量相同的重物 A 和 B。这两种重物都会受到重力 $m_{\text{引}} \cdot g$ 和地球自转造成的离心力 $m_{\text{惯}} \omega^2 R \cos \varphi$ 的作用，其中 ω 是地球自转的角速度， φ 是地理纬度。如果惯性质量与引力质量等价，则两重物所受离心力相等，力矩互相抵消，扭秤维持平衡。如果惯性质量与引力质量不成正比，则扭秤失去平衡，而使悬丝扭转。

那么，如何测定悬丝扭转呢？厄缶用望远镜对准悬丝上挂着的小反射镜，观察望远镜上方的短刻度标尺，从而测量偏转角。为了避免系统误差，厄缶还将横杆转 180° ，换一个方向测量。

如此精确系统的测量，1889 年厄缶得到的第一次结果，实验精度达 5×10^{-8} 。1980 年得到第二次结果， $\Delta = 3 \times 10^{-9}$ ，后一结果直到厄缶死后三年才正式发表。

细心的弗许贝克认为，厄缶当年列出不同材料引力加速度的极微小差别也许不是实验误差，有可能是真实效应。也就是说，对于真空的自由落体，轻物下落快、重物下落慢，过去把它归咎于实验中偶然出现的一种干扰，可是弗许贝克等却不轻易放过这一反常现象。

他们认为，在真空中，轻物（比如鸡毛）之所以比重物（比如铁块）下落快，正是因为对物体起作用的不仅是重力，另外还有一个较小的排斥力，弗许贝克等称其为“超电荷力”，也就是第五种力，它与两个物体之间的引力方向相反，并使不同结构和质量的物体产生稍微不同的加速度。

从本质上讲，自然界所存在的多种类型的力，都可归结为四种基本相互作用。那就是引力作用、电磁作用、强相互作用、弱相互作用。

我们现在所观察到的宇宙，其尺度约为 150 ~ 200 亿光年。宇宙中的一切物体都是由一种看不到的力量在主宰着，那就是引力作用。但是它在强度上是四种基本相互作用中最弱的一种。

电磁作用是带电粒子与电磁场的相互作用以及带电粒子之间通过电磁场传递的相互作用。在强度上它次于强相互作用而居于四种基本相互作用的第二位。电磁力和万有引力一样是宇宙中普遍存在的一种长程力。

主宰着微观世界的是强相互作用和弱相互作用。强相互作用是使核子结合成原子核的作用。在强度上它是四种基本相互作用中最强的一种。它不像万有引力和电磁力那样是长程力而是短程力。但是它的力程比弱相互作用的力程长，约为 10^{-13}cm 。大约等于原子核中核子间的距离。

弱相互作用是存在于原子核内部的一种相互作用。在强度上它次于强相互作用和电磁作用之后居于四种基本相互作用的第三位。它也是一种短程力，力程约为 10^{-15}cm ，比原子核的半径还小两个数量级。因此，这种力在极

短距离内起作用，尽管如此，它在自然界中却扮演着相当重要的角色。没有它，太阳和许多恒星就会熄灭，无法产生由氢形成氦的持续聚变。

这样，四种强度悬殊、性质各异的基本力，完全控制了我们的宇宙。不过，物理学家们早就怀疑这四种力在宇宙混沌初开的某一阶段可能原来是一种作用力，后来随着宇宙的演化而各自成家了。

长期以来，不少物理学家就致力于这四种基本力的统一工作，以还其庐山真面目。1967年温伯格和萨拉姆成功地把电磁作用和弱相互作用统一起来，建立弱电统一理论。

目前，物理学家们正乘胜出击，致力于建立所谓大统一理论，把电磁作用、弱相互作用和强相互作用三种基本力统一在一起，以及更进一步地建立起大统一理论，把所有四种基本力统一起来。

由于自然界的四种基本力是决定所有物质运动及其运动状态的依据。现在有可能存在第五种基本力，自然引起物理学界的极大兴趣。

然而，第五种力是否真正存在，首先是一个实验问题。所以近二十余年来，人们在实验室里、矿井中、电视塔上、悬崖旁、海底下做了大量实验，设计了许多精密仪器，以便证实或否定它的存在。探测第五种力的实验大致可以分成下列三类。

第一类实验是把地球作为引力源，测量离地心不同距离处重力加速度的变化，以此和按牛顿平方反比定律算得的理论值相比较。例如，墨西哥湾 1100 平方公里范围内海底海面的 703 个重力数据；澳大利亚西北昆士兰 14000 个钻孔提供的地层及重力数据等。

第二类实验是测量同一引力源（如大崖岩石）对质量相同而成分不同的物体的引力作用差别。例如美国布鲁海文国家实验室的新型加速度仪，实验中浸在水中的悬浮铜球壳（内充满水），在高出哈得逊河 161 米的崖壁的作用下，测其加速度，分析铜与水所受到的作用力大小。

第三类实验测量反物质——目前用的是反质子和正电子——在地球引力作用下的加速度，如果存在与重子数和轻子数相关的第五种力，则其加速度将和质子、电子的不同。实验计划已获得批准，但还未取得结果。

显然，理论认识是否正确，最后要经过实验的检验。尽管目前第五种力的存在的探索实验多种多样，但要真正证实第五种力的存在，尚需做更多、更精密的实验才能做出最终结论。

牛顿力学三大定律

牛顿对自然科学的贡献的确卓越非凡，前无古人。但是，这些贡献也不是牛顿一个人一下子带给人类的，他是站在许多巨人的肩上举起那只带给人类光明的火炬的。

牛顿生逢其时，当时力学知识的发展已达到了应该总结而且可以总结的阶段。例如，关于地球上物体的运动，他之前已经有人明确地反对了亚里士多德的错误观点。前面已提到过的布里丹的冲力理论中实际上已接触到了惯性、力、动量等概念，并且也已认识到力是改变物体运动的原因，因此有人把布里丹称为现代动力学奠基人之一。巨人伽利略更是如此，牛顿第一和第二定律实际上是伽利略动力学的大胆外推。第三定律是在研究物体碰撞时动量的变化而引出的。而碰撞现象在他之前有笛卡尔等，他的同代人如惠更斯等都曾研究过并且得出了一些近似正确的或正确的结论。关于天体的运动，在他之前，哥白尼、第谷·布拉赫和开普勒还有伽利略都已经逐步深入地从观测和计算两方面进行了研究。到牛顿那个时代，的确已达到了能够最终解决而且必须解决的门坎上。牛顿的同代人中就有胡克、雷恩等人几乎已经要得出和他相同的结论了。水到渠成、瓜熟蒂落，牛顿理论的出现有它的历史必然性。当然，这也和他的天才，他的实验和理论上的努力探索和刻苦研究分不开的。

下面我们将先介绍牛顿是怎样说明他的三个定律的。这些都完整地出现在他的《原理》一书开头的几页中。牛顿从几个定义开始写起。

定义 物质的量是用它的密度和体积共同量度的。

用现代的语言和符号表示，就是：物体的质量（ m ）等于它的密度（ D ）和体积（ V ）的乘积，即

$$m = DV$$

定义 运动的量是用它的速度和物质的量共同量度的。

用现代的语言和符号表示，就是：物体的动量（ p ）等于物体的速度（ v ）和质量（ m ）的乘积，即

$$p = mv$$

定义 物质的惰性力或固有力，是一种反抗的能力，由于这种力，任何物体，都要保持其静止的或匀速直线运动状态的现状。

对此定义，牛顿又作了如下的说明：“由于物质的惰性，物体要脱离其静止状态或运动状态是困难的。基于这种考虑，这种表示惰性的力可以用一个最确切的名称，叫做惯性或惰性力。”惯性作为一个物体在运动中表现出来的固有的或天然的属性的名称，一直沿用到今天。牛顿还指出：“这种力总是与具有该力的物体成正比。”这句话在现代的教科书上通常都写成：一个物体的质量是它的惯性大小的量度，质量大的惯性大。

定义 外力是加于物体上的、改变其静止或匀速直线运动的状态的一种作用。

力的概念，最初是与人的推拉动作中肌肉紧张的主观感觉相联系的，是牛顿首先给出了力的这个客观的、普遍的、确切的定义。他还指出：“外力只存在于作用的过程中，作用一旦过去，它就不复存在。一个物体能保持其新获得的运动状态，仅仅是由于它的惯性，但是外力的来源可以不同，例如由于碰撞、压挤或向心力等。”这些也是对于力的概念的很重要的说明。

在定义质量、动量、惯性和外力之后，牛顿又阐述了他的时间和空间的概念。接着他叙述了他总结的三条运动定律。

定律 每个物体都要继续保持它的静止状态和匀速直线运动状态 除非由于所加的外力迫使它改变这种状态。

这就是牛顿第一定律。由于像上面所说的，物体所以保持其运动状态不变是由于它的惯性所致，所以这条定律又叫做惯性定律。在第二章中我们曾说过，伽利略也曾得出：物体不受外力时将保持其匀速直线运动状态不变，或者说，匀速直线运动是物体的“天然运动”。但同时伽利略还认为匀速圆周运动也是物体的“天然运动”。在这一点上，牛顿比伽利略前进了一步，认识到只有匀速直线运动才是物体的天然运动。

静止和运动都是相对的。牛顿也曾指出：“像大家所知道的，运动和静止只有相对的区别；那些通常被看作静止的物体，并不总是真正静止的。”这里牛顿实际上提出了运动的参照系的问题。同一物体对于这一参照系是静止的，对另一参照系可能是匀速运动的，对另外一些参照系又可能是做非匀速运动。因此，要说明一个物体是运动或静止，必须事先明确所用的参照系。牛顿第一定律实际上是对这样的参照系说的，相对于这种参照系，一个不受外力作用的物体将保持静止或匀速直线运动状态不变。这种参照系叫惯性参照系或惯性系。一个参照系是不是惯性系，要根据实验或观察来确定。天文观测证明，以太阳作参照物的参照系是惯性系。实验还证明，相对于地面来说明物体的运动时，这种地面参照系很近似于惯性系。

第一定律可视为牛顿的惯性和力的概念的直接引伸，指出了物体不受外力时的运动状态。从这里也就自然引出了问题：物体受到外力作用时的运动状态如何？这就是牛顿第二定律要解决的问题。

定律 运动的变化与外加的动力成正比 并且发生在该力的作用线方向上。

这就是牛顿第二定律。参照《原理》中其他的说明可知，此处“运动”的意思应该就是指动量，而“运动的变化”实际上应该是“动量对时间的变化率”。用现代的语言，牛顿第二定律通常表述为：“物体的动量的变化率与它所受的外力成正比，方向与外力的方向相同。”

以 p 表示物体的动量， Δp 表示在 t 时间内动量的增量，则 $\Delta p / t$ 就表示在单位时间内动量的增量，即动量的变化率。再以 F 表示物体所受的外力，则上述定律 可用下述公式表示，

$$F \propto \frac{\Delta p}{t}$$

把它改成等式，有

$$F = k \frac{\Delta p}{t} \quad (1)$$

式中 k 是比例常数。当力和动量以及时间选用适当的单位时，可以使 $k=1$ 。这样上式就可简写为

$$F = \frac{\Delta p}{t} \quad (2)$$

按前述定义 $p=mv$ ，在牛顿看来，一个物体的质量 m 是不会改变的（在牛顿时代以及其后的两个世纪中，实验证明也的确如此）。因此，（2）式又

可写成

$$F = \frac{p}{t} = \frac{(mv)}{t} = m \frac{v}{t}$$

再根据伽利略的加速概念， v/t 就是物体的加速度 a 。因而上式又可写成

$$F = ma \quad (3)$$

这就是现今一般教科书中常见的牛顿第二定律的数学表达式。用文字说明，就是：一个物体所受的外力等于它的质量和加速度的乘积。

由 (3) 式可得

$$a = \frac{F}{m}$$

此式说明，对于质量不同的物体，在同样的外力作用下，所产生的加速度和质量成反比，质量大的加速度小。加速度小表示该物体比较难改变其速度，或者从反面说，表示该物体保持其原有运动状态的固有属性——惯性比较顽强。因此，可以说，质量大的物体的惯性就大。这就定量地说明了在前述定义中牛顿所阐述的质量和惯性的关系。

利用 (3) 式或 (2) 式进行数学运算时，必须对力、质量和加速度采用配套的单位，以使得 (1) 式中的 $k=1$ 。在现今通用的国际单位制中，质量是用“千克”做单位，加速度是用“米/秒²”做单位，力的相应的单位是“千克·米/秒²”，也叫“牛顿”。1 牛顿是这样大的一个力，在它的作用下，质量是 1 千克的物体产生 1 米/秒² 的加速度。这样，要使 300 千克的车辆产生 0.5/秒² 的加速度，根据 (3) 式，所需的外力就应该是

$$F=ma=300 \times 0.5=150 \text{ (牛顿)}$$

关于力和加速度的关系，牛顿还以推论的形式作了补充说明。在运动定律之后有两个推论是这样写的：

推论 一个物体同时受两个力的作用时，将沿着一个平行四边形的对角线运动，所用的时间和两个力单独作用时物体分别沿着两边运动的时间相同。

推论 这就说明了任何一个直接的力 AD 可以由两个互成角度的力 AC 和 AB 合成，反过来，任何一个直接的力 AD 也可以分解成两个互成角度的力 AC 和 AB 。这种合成和分解在力学上已充分地肯定了。

这两个推论清楚地说明了力的独立作用原理（现代的说法是：几个力同时作用在一个物体上时，每个力都各自产生自己的加速度，好像其他力不存在时一样。这时物体运动的加速度是各个力所产生的加速度的合成）和力的合成和分解的平行四边形法则。在这个基础上，牛顿第二定律就可应用于一个物体同时受几个力作用的情况。这种情况下，(3) 式的形式保持不变，其中 F 应理解为物体所受的几个力的合力，而 a 是物体运动的实际（合成）加速度。

牛顿第二定律使人们有可能区别重量和质量这两个不同的概念。我们知道，自由落体运动是一种匀加速运动，它的加速度是物体受到重力作用的结果。以 g 表示重力加速度，以 m 表示物体的质量，以 p 表示物体所受的重力，根据上面 (3) 式，就应该有

$$p = mg \quad (4)$$

重力又叫重量，上式就表明了一个物体的重量和它的质量的关系。

从伽利略开始，人们已经确认了轻重不同的物体是同时下落的，因而在地球上同一地点，所有物体的重力加速度都相同。上式中的 g 就是一个常数。因此，根据（4）式，就可知道，对不同的物体来说，它的重量和质量是成正比的。

（4）式中重量和质量是作为两个不同的物理量出现的。正是牛顿首先把重量和质量在概念上清晰严格地区分开的。在他以前人们实际上只有重量的概念。牛顿通过研究物体的运动而认识到，物体的质量是和重量不同的另一个概念。质量反应物体惯性的大小，没有什么方向；而重量是一种力，方向总是向下的。一个物体的质量和它在地球上的位置无关，而它的重量则随所处地点的不同而有明显的改变。停在地上的一辆车子，它受的重力已被地面对它的支持力平衡而对它自己的运动不起作用了。但要沿水平方向推动车子，还需要用力以克服其惯性，这就是物体的质量这个属性在起作用。

尽管质量和重量反映客观的不同属性，但二者还是有密切联系的。这就是（4）式所表明的正比关系。虽然如上所述，伽利略的自由落体实验肯定了各种物体下落的 g 相同因而重量和质量成正比，但他的实验太粗略了。为了精确地肯定这一点，牛顿还亲自作了实验，在《原理》一书中，描述了这个实验。他做了两个相同的圆的木头盒子，一个里面装木头，另一个的中心装上重量相同（尽可能精确）的金块。然后将两个盒子都用 11 英尺长的线吊起来成为两个单摆，并使它们一起摆动起来。他观察到两个摆在相当长的时间内以同一频率振动。他论证说，频率相同，说明它们的加速度相同。根据第二运动定律，它们的质量就应该和所受的动力成正比。在单摆的情况下，使之摆动的动力与它们的重量成正比，因此这实验就证明了两个摆锤的重量和它们的重量成正比。牛顿还在木盒子内改装其它的材料，如银、铅、玻璃、砂子、食盐、水和小麦等做实验，也得到相同的结果。他还特别申明他的实验的精确度：“对同样重量的不同物体，如果它们的质量相差到千分之一，我也能很肯定地测出来。”这就是说，他的实验精确度是千分之一。重量和质量成正比的结论，是自然界的一条很重要的规律。两百多年后的 1915 年，爱因斯坦在这一规律的基础上创立了广义相对论。为此，后人对这一规律还不断地用实验验证过。比较著名的实验有：匈牙利的厄缶

（B. R. Von Eötvös, 1848—1919）在 1909 年用扭秤做的实验，他的精确度达到十亿分之一；1964 年美国的狄克等人改进厄缶的实验，他们的精确度达到一千亿分之一。

定律 对每一个作用力总存在一个相等的而且方向相反的反作用力，或者说两个物体彼此施加的相互作用力总是相等的，并各指向对方。

这就是牛顿第三定律，也叫做反作用定律。牛顿用十分通俗的例子说明这条定律的意义：“拉引或推压另一个物体的物体，一定也要被另一个物体拉引或推压；你用手推压一块石头时，手指也被石头所推压。如果一匹马拉一块拴在绳子上的石块，则它也会被相等的力拉向石块……”。除了这种直观地解说以外，牛顿还特别指出了由于这条规律的作用，两个物体相碰时，它们的运动都将发生变化：“如果一个物体撞到另一个物体上，并且由于它的力的作用而改变了后者的运动，那么这物体的运动也将（由于相互的压力相等）发生一个相等而方向相反的变化。”他还着重指出，这里所谓的变化，并不是物体的速度的变化，而是物体的动量的变化。牛顿正是根据观察这种两个物体相碰时的动量变化来验证第三定律的。为此他做了两个单摆摆球相

撞的实验。他发现不论两球是硬还是软，即不管两球的弹性如何，它们直接相碰时，总是在相反的方向上产生相等的动量变化。根据这个事实，“所以，作用反作用总是相等的。”

初学物理的人，在知道了牛顿第三定律后，往往怀疑它的正确性，认为作用和反作用不可能相等。他们还举例证明，说：如果相等，那么马拉车、车拉马的力就会相互抵消，马就根本拉不动车了。其实这是一种误解，因为作用和反作用是分别作用在不同的物体上的，所以谈不上抵消。根据第二定律一个物体的运动只决定于这个物体受的力，而和它对其它物体的反作用力无关。在马拉车的例子中，车的运动就决定于马拉车的力 F ，车拉马的力是 F' ，作用在马上，对马有作用，对车本身的运动并无影响。一辆停着的马车，所以开始运动（即有了加速度），是因为马拉它的力 F 比地面对车轮的摩擦力 f （这两个力都作用在车上）大，因而车受到了向前的合力的缘故。

牛顿定律我们就介绍到这里。

惯性力——科里奥利力

人类的视野是广阔的。他们不仅看到了天空和海洋，看到了眼前的物质，看到了各种力的作用，也看到了赖以生存的地球所蕴含的深刻运动现象。

法国的一位工程师和物理学家科里奥利发现，当物体在作为参考系的转动物体上运动时，会受到另一种惯性力（即科里奥利力）的作用。由于地球是一个转动参考系，所以地面上运动物体一般都受到科里奥利力的作用。

1851年2月3日，物理学家傅科，向法国科学院报告了他用单摆证明地球自转的发现，宣布了摆动平面所描绘的圆与纬度的正弦成正比。

这个成功的发现，促使傅科把单摆按比例放大，并搬到巴黎的伟人祠去做。消息一传出，立即成了轰动巴黎的一件奇闻。

第二天，巴黎街头人声鼎沸，对科学发现有兴趣的人们，纷纷拥入伟人祠门内，而从里面出来的人都啧啧称赞着：“真是奇迹，我竟能看见地球的自转！”

在伟人祠的高大建筑物里，高高的圆屋顶上悬挂着一个巨大的单摆。这个单摆摆长67米，相当于一座20层楼房的高度，下面悬着一个28千克的重球，正在缓慢而单调地摆动着。

“这有什么稀奇，这不过是一个巨大的单摆而已！”刚挤进伟人祠的人群中有人不禁有些失望。

“请注意单摆的摆动方向！”站在旁边的傅科提醒大家。

人们顺着傅科的手指望去，只见台面上撒了一层细沙，巨摆紧贴着台面摆动，细沙上清晰地留下一条摆动的痕迹。几分钟过去了，人们不由得惊奇起来。原来，单摆的每一次摆动，它的方向都有一点微小的变动。一个小时以后，单摆的方向移动了十几度。

“是什么力使巨摆转动呢？”观看的人们迷惘地四下张望着，“怎么找不到这个力啊？”

这时，傅科又站在圆台前大声对大家说：“女士们、先生们，单摆摆动的方向并没有变动，而是我们脚下的地球在时刻不停地转动！”

经过几分钟的安静之后，人们又一次沸腾起来，他们完全被这个出色的实验表现征服了。在巨摆下面，地球自转竟然表现得如此清楚，如此分明！大家不由自主地拥上前去，紧紧地和傅科拥抱，向他表示祝贺。

在以后的两年中，世界许多地方多次重复了傅科的实验，研究摆的科学论文也成倍地增长。

话再说回来，傅科又是怎样作出这一发现呢？

原来，他对摆和地球自转问题的兴趣，缘于天文观察。当时他只有26岁，因要拍摄天空中星体的照片，就需要长时间曝光，望远镜系统在拍摄过程中也就得连续保持指向天空中的目标。

为了控制望远镜系统的运动，使它能跟踪目标，傅科仿照惠更斯未曾实现的圆锥摆钟方案，做了一台特殊的钟，并用一根钢棒支撑摆锤。

就在加工钢棒的过程中，细心的傅科注意到，当把一根钢棒夹在车床的卡子上，用手转动车床时，钢棒振动总是要维持它原来的振动平面，不随车床转动。

这一不期而遇的力学现象，立即引起傅科的重视，使他联想到是不是可以用类似的方法，做一个表演来证明地球的自转。这个想法一直在他的脑海

中萦绕了多年。

1851年1月8日，傅科正在家里观察一个2米长的单摆，想进一步研究单摆的运动规律，几小时过去了。他突然发现，摆动平面不断缓慢旋转，逐渐转向“天球昼夜运动的方向”。

惊喜若狂的傅科又在巴黎天文台大厅里，用8米长的单摆重复这一试验，取得成功。接着，便是本文开头的一幕，傅科向法国科学院报告了他的发现。

单摆做得很长，摆锤做得很重，便可使摆动持续较长时间，并使摆本身的惯性加大，抵抗空气阻力的本领也增大。这样就可使人们把摆动方向的变化看得更清楚。

为了表彰傅科的功绩，各国科学家一致决定，把巨摆命名为“傅科摆”。

轰动巴黎的傅科摆表演，生动而形象地证明因地球自转而引起科里奥利力的理论，并且告诉人们地面上的这种偏转力是沿水平方向的，从而使长期以来对河流、海洋这一类因地球自转有明显影响的现象研究，获得坚实的力学基础。

摩擦力——摩擦定律、滚动和滑动定律

在我们的周围，有各种各样的摩擦现象。人走路、坐定和工作，得依靠摩擦；各种车辆行驶，要依靠摩擦；任何房屋建造，离不开摩擦；就是耸入云霄的高山，也要依靠岩石、砂和土之间的摩擦……

假如摩擦在世界上突然消失了的话，人无法走路，手无法拿东西，桌椅、板凳就要散架，汽车、自行车装配不起来，任何建筑物也不可能建造起来，一切物体都要向低处滑溜……应用和研究摩擦也就成为力学中的最重要课题之一。

法国著名科幻小说家儒勒·凡尔纳曾在他的《马蒂斯·桑多尔夫》中，描写了一个名叫马蒂夫的大力士，他力大如牛。作者在书中写了这样一件事：

“特拉波科罗”号这艘 50 吨重的新船停在船坞里，正准备下水，人们只要把绳索砍断，船就会很快滑下去。

“呼”的一声，香槟酒瓶撞在船头上，酒沫飞溅，船工们砍断缆索，新船“特拉波科罗”号立即沿滑架向水中滑去。

突然，有一只快艇驶来，眨眼工夫，快艇已驶到船坞正前方。这时，眼见滑下水的新船“特拉波科罗”号将和这艘快艇相撞，岸上的人都惊恐万状，束手无策。

就在此时，只见马蒂夫一个箭步跨到船跟前，抓住拴在船头的缆索，在埋入地面的铁桩上绕了几圈。他冒着被甩死的危险……，用手拉住缆索僵持了大约 10 秒钟。最后缆索断了。

可是这 10 秒钟时间已经够了！“特拉波科罗”号进水以后，只轻轻地掠了一下快艇，就向前驶去了。快艇脱了险，马蒂夫也安然无恙。

马蒂夫的勇敢行动确实令人敬佩。可是，从力学角度看，任何一个能使出 10 千克力的人，即使是个孩子，也能创造这一奇迹的。这是因为摩擦力帮了他的忙。下面不妨请你算一算。

原来，绕在铁桩上的绳索在滑动的时候，摩擦力可以达到极大的限度。绳索绕的圈数越多，摩擦力也就越大。摩擦力增长的规律是：如果圈数按照算术级数加多，摩擦力就按几何级数增长。

18 世纪数学家、力学家欧拉，曾经确定过摩擦力跟绳索绕在桩子上的圈数有下列关系：

$$F = fe^{ka}$$

式中 f 表示我们所用的力， F 代表我们所要对抗的力（也就是希望绳索产生的摩擦力）。 e 表示数 2.71828……（自然对数的底）， k 表示绳和桩子之间的摩擦系数。 a 表示绕转角，也就是绳索绕成的弧的长度跟弧的半径之比。

把这个公式应用到儒勒·凡尔纳的故事里，所得到的结果非常令人吃惊。

由于新船“特拉波科罗”号的重量是 50 吨，假定船坞的坡度是 $1/10$ ，那么作用在缆索上的力只有船重的 $1/10$ ，也就是 5 吨。

现设 k ，即缆索和桩子之间的摩擦系数的数值为 $1/3$ 。并假定马蒂夫曾经把缆索绕桩 3 圈，那么

$$a = \frac{3 \times 2\pi r}{r} = 6\pi$$

把这些数值代入欧拉的公式，可得

$$5000 = f \times 2.72^{6\pi \times \frac{1}{3}}$$

$$= f \times 2.72^2 \quad \log 5000 = \log f + 2 \quad \log 2.72$$

$$f = 9.3 \text{ 千克}$$

所以,尽管马蒂夫是大力士,但他只用 10 千克的力,就可以把缆索拉住。

1781 年,炮声隆隆,英法两国正为争夺殖民地而交战。法国政府看到自己的海军力量不如英国,就决心在改进海军设施的设计上下功夫。

于是,该年法国科学院进行悬赏征文,其中有一个题目是“关于摩擦定律和绳索的牢固性问题”。要求是“做新实验,结果应有大规模应用的价值,并能运用到对海军有价值的机器,例如:滑轮、绞盘和斜面上去。”

没过几个月,一辆马车驶近的响声,在科学院的大门前停止了。原先坐在院秘书处的那个男人,仔细听了一下从门口传来的声音,便站起身来,信步走到窗前,一眼就看出,是皇家工程部的高级军官库仑,从马车里走了下来。

原来是库仑亲自前来送交应征论文。他的这篇题为《简单机械的理论》的论文,紧紧围绕与滑轮、绞盘和斜面密切有关的实验研究,观测得是那样仔细,分析得又是如此透彻。因而不久就赢得了该奖。

库仑以其敏锐的眼光,指出影响摩擦力的因素有:接触表面的性质及其涂层,表面承受的压力,接触时间,表面滑动的速度,空气的湿度或干燥程度等条件,一共 12 项之多,从而具体明确地表述了摩擦定律、滚动定律和滑动定律。

库仑还以其灵巧的双手,逐项逐项地进行试验,经过艰苦的研究,他总结出下列经验公式:

(1) 对于滑动面之间的摩擦:

$$F = A + \frac{P}{\mu}$$

式中, F 表示摩擦力, P 表示正压力, μ 为摩擦系数的倒数, A 表示一恒定不变的力。

(2) 对于斜置的滑动面

$$F = \frac{A\mu + p(\cos n + \mu \sin n)}{\mu \cos m + \sin m}$$

式中, n 为斜面与水平面的夹角, m 为力 F 的作用方向与斜面的夹角。

(3) 对于滚动摩擦

$$F = k \frac{P}{r}$$

式中, r 为圆筒半径, k 为滚动摩擦系数。

正由于库仑对摩擦力的卓有成效的研究,他不仅得了奖,而且于次年当选为法国科学院院士。为了保持较好的科学实验条件,库仑仍在法国军队中服务,但他的名字却传遍了欧洲科学界。

弹性力——胡克定律

胡克定律是表示弹性力与形变之间关系的定律。弹性力是自然界中广泛存在的一种力。例如，弹簧形变时产生的力，泡沫塑料被压弯后要恢复原状时产生的力；扭转柱体或轴杆的扭转角很小时所受的力等都是弹性力。

弹性力的变化遵循一定规律，这个规律是由胡克首先发现的，但当时却用字谜的形式予以公布。胡克为什么要用字谜公布自己的发现呢？这里面也蕴含着一个耐人寻味的故事。

胡克对空气泵的改进取得很大成功，计时器的研究又引起他极大兴趣。在这以前，摆钟已由伽利略发明，但一台附有摆锤的计时器携带起来很不方便，特别是在航海的船上更是需要便于携带的计时器。

头脑机灵的胡克就想，如果能用螺旋弹簧来代替摆锤，从螺旋簧的振动获得等时信号，不也可以控制计时装置吗？

正是一个奇妙的设想，在这里胡克创造性地把弹簧形变时产生的弹性力和计时器指针运动所需要的推动力紧密地联系起来。

顺着这条思路，聪明能干的胡克把螺旋弹簧安在平行轮的轴上，组成一套能够不断摆动的摆轮，再装进计时器中。新颖的设计方案，立即得到几位有威望的科学家的支持，胡克还准备申请专利。可是不知什么原因，当时这项研究没有继续进行下去。

过了好几年，荷兰物理学家惠更斯制成用螺旋弹簧控制的钟。胡克一得到这个消息，顿时满腹疑虑，心甚不平。他怀疑自己的发明被他人剽窃了。

于是，这位能干的实验家，心急火燎地找到时钟制造者汤平，两人在实验室里合作制成了一台弹簧钟。望着这台新计时器，胡克内心充满喜悦，又忧虑重重，以致别出心裁地在上面对刻写着“罗伯特·胡克发明于 1658 年，托马斯·汤平制作于 1675 年”。发明年份与制作年份先后相差 17 年，其用心可谓良苦。

不仅如此，一心要夺回新计时器发明权的胡克，还集中相当多的精力投入有关弹簧弹性的研究。他进行一系列实验，正是在实验中，探索到一个重要的结论：任何弹簧的弹性都与其张力成正比，并可简短地表达为：“弹性与力成正比”。

此时的胡克欣喜若狂，但定心一想，又唯恐再次丧失发现权。怎么办呢？踌躇不前的胡克思考再三，决定采用下列字谜的形式：

这个字谜的内在确切含义，要人们去猜度是极困难的。原因在于，它把弹性与力成正比的表述的每个印刷符号都拆开，并按音序重新加以排列。这样一来，胡克自认为是保住了有关弹性定律的发现权。

两年后，胡克在他的《论弹性的势》一书中解开了上面提到的字谜，并宣称他在 18 年前便发现了这个定律。

胡克在书中，还用四种弹性物体的行为来说明该定律：

(1) 一个轴垂直的金属丝螺旋，上端固定，下端荷载秤盘和砝码。随着增加荷载，此螺旋成正比伸长。

(2) 把一根钟表发条上紧成垂直的螺线，里端固定，外端附着在一个与此发条同轴的轻巧的齿轮的辘上，后者盘绕有一根线，丝线的松端悬吊一个很轻的秤盘。秤盘中加载多大的砝码，这齿轮即能转过多大的角度。

(3) 在一根悬吊的长长的线（胡克建议长度为 20、30 和 40 英尺）的下

端装上一个秤盘。每在秤盘中加载一定的砝码，这线就会伸长相应长度，这可以用罗盘测量从地面到秤盘的距离来获知。

(4) 给干燥木质的伸臂的自由端加上荷载，可以用来证明挠曲变形也遵循这条定律。

胡克没有明确提到弹性限度问题，但从他的叙述中实际上已暗示了这一条件。

这个定律后来经过柯西于 1882 年引入应力与应变这一对概念，以及格林 1837 年的改进，成为在弹性极限内，表示应力与应变之间的线性关系的定律。尽管如此，这个定律现在公认是由胡克提出的。

浮力——阿基米德定律

涉及到浮力，人们就会想起阿基米德发现浮力、曹冲称象的故事。其实自然界中的浮力，早为人们所认识，无论在古代还是在现代，都得到广泛的应用。

浮力起重法

在我国辽阔的土地上，历代劳动人民曾经建造了无数的桥。其中最原始的就是浮桥。

公元前 257 年，秦曾在黄河上架设了一座大浮桥——蒲津桥（在山西蒲州即现在风陵渡）。这座颇为著名的浮桥横恒万丈，气度非凡，桥下河水哗哗，水深流急。由于筑墩困难，它是用上百艘船只作墩柱，用竹索、木料捆扎进行加固的。

到了唐开元十二年（公元 724 年），进行了一次大规模修建：除疏通河道、维护堤岸外，特地增设了八条铁牛以维系浮桥巨缆。而每只铁牛重达数万斤，因它有铁座，座下有铁柱，埋入地中，从而把浮桥牢牢地拉住，不让浮桥被黄河水冲走。

可是到了北宋庆历年间，即公元 1041 年至 1048 年间，有一次滔滔黄河水像千万匹脱缰的怒马，无情地淹没了两岸的庄稼，吞噬沿河的大批房屋，彻底冲垮了这座蒲津桥，岸边的八只铁牛也被洪水拉进河中，沉到河底的淤泥里去了。

蒲津桥旁的铁牛落水后，整整理埋没了约 20 年。一直等到治平三年（公元 1066 年），官府又准备进行修桥，人们才想到要把这些重达数万斤的铁牛从水中打捞出来。

据《宋史》记载，当时官府“募能出之者。”想来是出了招贤榜，招募能把铁牛从河里捞上来的“贤人”。榜前围了好多人，大家议论纷纷：谁有那股神力？忽然见有一人，挤进人群把榜揭了下来，这是一位名叫怀丙的和尚。

经过几日的准备，适遇水浅时，怀丙和尚立即带人，把两艘装满泥土、石块的大船划到铁牛沉没的地方，并排拴在一起，派人潜入河底，用绳索的一端拴住铁牛，另一端绑在两船的大木架上。然后等到河水上涨时，他就指挥大家把船上的泥土、石块铲到河里。随着泥土、石块的减少，两船逐步上浮，被拴住的铁牛渐渐地从淤泥里被拉出而稍稍露出水面。此时，正在岸边观看的老百姓情不自禁地欢呼起来，众口称赞怀丙和尚想出的巧妙的方法取得了成功。

借浮力起重，是中国古代一个创造。怀丙创造的浮力起重法，曾得到著名科学史家李约瑟的高度评价，他说：“在现代，怀丙的方法已成为标准的实用的方法。”确实如此，现代打捞沉船，有一种叫做“浮筒打捞法”，即把一组浮筒拖到沉船的作业区，使它们灌满水并沉到水底，然后由潜水员下水，用钢缆把浮筒与沉船拴住。接着开动打捞船上的压气机，把空气压进这组浮筒，这些浮筒就会带着沉船一起浮到水面。

用水法检验轮子质量

战国时期以后，车成为交通运输的重要工具。因此，我国古代劳动人民很注意造车的各种工艺，也积累了许多宝贵经验。其中车轮制作的检验方法十分简易、巧妙，又合乎科学道理。

我国古代手工艺专著《考工记》中的《轮人》条专门记述了“规”（规）、“蒿”、“水”、“县”、“量”和“取”六种检验轮子质量的方法，其中“水之，以眡（视）其平沈（沉）之均”的一法，充分体现了浮力知识的应用。

这种利用水法，来检验轮子质量的具体操作是：把轮子放在水里，看它沉到水面以下的部分是否平正，如果发现哪一方面有偏侧，那就表示这方面的质量太大，应该加以修理。

我们知道，一般木制的轮子，比重都小于水，所有放在水里，总是有一部分沉入水面下，另一部分浮出水面。

如果轮子的质量分布是均匀的，那么它的重心就一定位于它的几何形状的中心。这样的轮子，放在水里，必然是平正而不会倾侧的。因为放下水去的时候如果是倾侧的，浮力的作用点，也就是浮心，就将偏在沉下去较多的一边，这时重力的作用点如作用在几何中心位置上，竖直向上的浮力和竖直向下的重力就形成一个力偶，这个力偶使轮子恢复水平。而当轮子平正地浮在水面上时，重力作用线和浮力作用线刚好重合，浮力与重力就平衡了。

要是轮子的质量分布不均匀，情形恰好相反，这时轮子的重心一定偏在一边。如果它平正地放入水中，浮力的作用点，也就是浮心在正中，浮力和重力这时形成力偶，使轮子较重的一边下沉，较轻的一边上浮。直到重力作用线和浮力作用线重合时为止，轮子才静止。

这样，只要把轮子放进水里，如果轮子平正地浮在水面，就表示它的质量是均匀分布的。如果倾侧，就说明质量分布不均匀，还需要修正。

利用轮子在水中的沉浮来检验轮子各部分质量分布是否均匀，这种方法从实践上看简单易行，从理论上也是正确合理的。

再值得一提的是，堪称集我国先秦时期应用力学知识之大成的《考工记》，是春秋末年齐国人的著作，也有人认为是战国初年的著作。总之，在公元前3世纪已开始流传，这比阿基米德发现浮力原理还要早一个世纪。

液体比重计

盐的生产，自汉代起，就受到我国朝廷的极大重视。测定盐水的浓度便与盐的生产直接有关。

古人从经验中知道，浓度越大的溶液可以浮起比重大的物体。于是，我国古代制盐工人，为了测定盐水的浓度，创制了世界上最早的液体比重测定装置。

宋代乐史在《太平寰宇记》中，记述了以10个莲子来测定盐水浓度的方法：“取石簾（莲）十枚，尝其厚薄，全浮者全收盐，半浮者半收盐，三簾以下浮者则卤未堪。”

“尝其厚薄”是指对10个莲子要有选择。“全浮者全收盐”，相当于该盐水浓度为100%；那么“半浮者半收盐”，即其浓度为50%。浮三莲以下，盐水浓度太淡，不可用此盐水煎盐。

宋代姚宽在台州做官时，曾因调查盐商舞弊，采用下列方法来测定盐水浓度：“择莲子重者用之，卤浮三莲、四莲味重，五莲尤重。莲子取其浮而直；若二莲直或一直一横，即味差薄；若卤更深，则莲沉于底，而煎盐不成。”

这是采用 5 个莲子来测定盐水的浓度，意思是在测定时要挑选重的莲子供用，倘若 5 个莲子能由盐卤中浮出 3 或 4 个，就是浓盐卤，如果 5 个中浮 5，便是最浓的盐卤。莲子最好是垂直地浮起；假如浮起莲子的数目不是 3 个，只有两个莲子垂直浮起，或一个垂直地、一个水平地浮起，这盐卤就是稀薄不良的。如果全体莲子都沉在卤底，这种盐卤，即使经过蒸发，也不容易得到食盐。

元代陈椿在《熬波图》中所记述测定盐水浓度的方法和装置，已极类似于近代浮子式液体比重计。他对此作了较为详细的介绍：

“莲管之法，采石莲，先于淤泥内浸（测定盐水浓度的装置）过，用四等卤分浸四处。最咸处卤浸一处；三分卤浸一分水浸一处；一半水一半卤浸一处；一分卤浸二分水浸一处。后用一竹管盛此四等所浸莲子的卤，放于竹管内，上用竹丝隔定竹管口，不令莲子漾出。以莲管汲卤试之，观四管莲子浮沉，以区别卤之咸淡之等。”

在这里，四等卤是：最咸为一等，浓度为 100%；三分卤一分水为二等，浓度为 75%；半卤半水为三等，浓度为 50%；一分卤二分水为四等，浓度为 33%。将莲子分浸于此四等卤中，也即让莲子逐渐地具有相应的咸度。这样，就为测定其他溶液的浓度制备好了“浮子”。将装有这些浮子的竹筒注入待测溶液，看它们的浮沉状态，溶液浓度就被相应地测出。这种方法正是现代液体比重计的雏型。

现代液体比重计——是一根密封的、刻有标度的玻璃管，管底呈球形，内置水银或铅丸。将其插入液体中，则其直立浮起。液体浓度越大，它浮得越高。

新型游泳衣

游泳技术并不复杂，但是初学者如果一开始动作训练走样，以后改过来就很困难，这是人的一种“先入为主”心理影响所致。

儿童怕水，以前在训练中解决的办法是套一只救生圈。

救生圈虽然可以使人浮出水面，但是人在水中的姿势是垂直的，这不符合游泳的姿势。游泳的最佳姿势是水平地浮在水面上，那么能不能变垂直为水平呢？

这个难题，前几年已为上海体院解剖教研室金季春主任所解决。他根据浮力的特性，别出心裁地设计了一种新型的训练游泳衣，也就是把救生圈和游泳衣合二为一。

新型的训练游泳衣的外形与普通游泳衣一样，但是人穿上后跳到水里，人体却能平躺在水上。那么，它的奥秘在哪里呢？

原来，人在水里受到两个力的作用，即人体自身的重力和水的浮力。重力的合力作用点在重心，浮力的合力作用点在浮心。人在水中的位置主要由这个力的关系所决定。

人在腋下套上救生圈后，浮心的位置在胸部，使人体在水中呈垂直状态。如果要使人体在水中保持水平状态，浮心的位置最好是在腹部，新型的训练

游泳衣就是根据力学原理设计而成的。

这种新型的游泳衣，不仅能使人体在水中的浮心位置移至下腹部，使人体保持水平；而且还能使人体保持最理想的游泳姿势，即人体上部的三分之一露出水面，下部的三分之二仍浸没在水中，不致影响游泳训练。

阿基米德定律

大家知道，关于浮力的定律，今天就叫阿基米德定律，阿基米德发现这一定律的过程，是通过古希腊学者维特鲁乌所写的书流传下来的。书中叙述了这样一个有趣的故事：

海罗在叙拉古取得王位后，为了庆祝自己的胜利，决定制造一顶纯金王冠放入圣庙，奉献给不朽的神灵，以表示还愿的心意。为此他给工匠称了适当重量的黄金，并限期做出。到了限期，工匠送来了制成的王冠，它精美无比，而且重量和当初称给他的黄金的重量相符。海罗王大喜。但后来传出的消息说，工匠偷窃了黄金，而所缺的分量用白银代替了。海罗王为自己受骗而十分气愤，但是他无法判定工匠的盗窃行为。于是，他就请智慧的阿基米德想办法。阿基米德受命后，一天他去洗澡，一跳进装满水的澡盆。他就发现他身体漫出澡盆多少，就有多少部分的水从盆中溢出。由于他心里老是想如何解决那个王冠问题，这一发现使他恍然大悟，终于找到了他朝思暮想的方法。

根据这个发现，他做了两件重量与王冠相等的物体，一件是纯金的，另一件是纯银的。然后他在一个大盆里放满了水，先是把银件放了进去，有些水溢出来了。这溢出的水的体积和银件的体积是相等的。然后，他把银件拿出来再用量杯向盆中倒水，直到水又满盆为止。这样他就测出了与一定量的水相对应的银件的体积。

做完这个实验后，他又把金件放入盆中，水又溢出一些，然后取出来，再用量杯把水倒入盆内。他发现这次溢出的水没有上次那么多。这就是说，金件的体积比重量相等的银件的体积小。最后，他又在水盆中放满水，并把王冠放进去，发现王冠排出的水比同样重的金件排出的水要多，这说明金冠里掺入了白银，那个工匠的盗窃行为被揭露了。

根据维特鲁维写的这样的描述，阿基米德是利用“体积替代法”，即利用水来测出不规则物体的体积的方法来解决王冠问题的。在这个故事里实际上他并未用到浮力原理，甚至在操作过程中也根本未利用浮力。因此，用这个故事说明阿基米德发现浮力原理是不确切的。这个方法有些类似我国曹冲称象时用的方法。但是，如前所述，曹冲用的是一种重量替代法。浮力在他的方法中起了重要的作用，他利用了水面上漂浮的物体所受的浮力和重量平衡的原理。

尽管如此，古希腊留下的文献证明，阿基米德的确提出了浮力定律。在《论浮体》一书中，阿基米德从下述的假设开始。

液体有下列基本性质：在液体内部所有均匀而连续的区域，受到较大压力的部分对受到较小压力的部分施加向上的力。但是，液体的每一部分都受到其正上方部分的压力，只要后者正在下沉或受到其他部分的压力。

在这样的基础上，他论证了一些命题，例如：

命题 2 任一静止液体的表面是以地心为心的球面（的一部分）。

命题 3 凡与等体积液体等重的固体，若置于液体内，它必将浸没到使其表面不致露出液面，但不会浸得更深。

命题 5 若将轻于液体的任一固体置于液体内，它将下沉到这样的程度，使该固体（在空气中）的重量等于其排开液体的重量。

命题 7 若将一重于液体的物体置于液内，它将下沉到液底，且若在液体内称其重量，则它减轻的重量等于其排开液体的重量。

这后三个命题虽然没有用到浮力的词句，但是确切地说明了物体在液体中所受浮力的规律，命题 7 尤其是这样。今天的叙述是：浸入液体的物体所受的浮力等于它所排开的液体的重量。

万有引力定律

万有引力定律，是人类长期社会生产实践和科学实验的产物。

还在公元前 4 世纪，希腊人就产生了各个天体环绕不动的地球运转的思想。此后，亚里士多德据此制定了关于宇宙结构的“地心说”。到了公元 2 世纪，亚历山大城的托勒密则用数学方法把这幅宇宙结构图景加以完善化和系统化，用单纯的匀速圆周运动的配合来表示观测到的行星的运动，提出了一个以地球为不动中心的太阳系构造学说。这样一个宇宙模型，虽然在当时观测的精确程度范围内，能够说明某些天体运动的现象，但是，它的哲学基础却是唯心主义的，它没有正确地反映出天体运动的客观真实情况。

这个学说，由于认为宇宙是有限的球形，全部宇宙被封闭在第八层天（恒星天层）的甲壳内，地球位于特殊的中心位置，除地球之外的一切天体都具有严格的正圆的形状，表面绝对光洁，而且循着“最完善的”几何形状——圆周轨道作天然的、永恒的循环运动。所以，这个体系就被宗教利用来论证“天上”与“地上”是严格区分开的宗教信条：“天尊地卑”。“上帝为了人类而创造宇宙，”“人类是天之骄子，居住在宇宙的中心”，等等。这样，托勒密的宇宙体系就成了宗教世界观的重要基础。地球中心说和神学融为一体，在西欧一直严密地统治着人们的思想达一千多年之久。

但是，随着人们对行星运动观测的进步和精确化，为了消除理论计算和实际观测之间的偏差，托勒密的宇宙结构图也被搞得愈来愈复杂、愈混乱。不仅不能帮助人们清楚正确地认识天文现象，而且还产生出一些荒谬推论。这就使许多天文学工作者对这一体系发生了怀疑。

15 世纪以后，对资本主义发展十分必要的远洋航行的发展，需要制定极精确的天体运行表以用来准确地确定远离大陆的船只的位置，这就要求对太阳系的真实的构造和各个星体的运行规律有正确的了解，消除地球中心说所带来的谬误。同时，资本主义农牧业的发展，也需要有更精确的历法。当时欧洲以地球中心说为基础的历法，长期混乱不堪，大部分沿用公元前 1 世纪制定的太阳历，每年定为 $365\frac{1}{4}$ 日，比地球绕太阳公转一周的实际时间约长 11 分钟。这个差数一年年积累，到 16 世纪已比实际时间差不多提早了 10 天，大大影响了农牧业生产。

在当时，用新的宇宙体系去代替托勒密体系，还不仅仅是一个正确与谬误的斗争，而首先是一场尖锐的阶段斗争。因为新兴资产阶级所进行的政治革命，要求必须冲破作为封建宗教思想统治的精神支柱的托勒密的神学宇宙观。

于是，在当时已经获得的丰富的天文观测资料和已经掌握的足够准确的数学方法的基础上，直接受到过资产阶级文化运动影响的波兰天文学家哥白尼明确提出了地球绕轴自转，地球和一切行星都绕太阳公转的“日心地动说”的宇宙图景。

哥白尼的太阳中心说，推翻了被封建统治阶级和宗教所维护的托勒密的地球中心说，把宗教教义所颠倒了客观规律重新颠倒过来。这是科学对宗教神学斗争的胜利。哥白尼体系的提出，是整个自然科学史上具有划时代意义的一次革命。它摧毁了地球中心、人类中心的神学宇宙观；它指出地球和其它天体都受着统一的规律的支配，根本不存在“天上”和“地上”的实质

性对立，摧毁了“神创观”，为太阳系的自然形成和发展演化的学说的产生开辟了道路。因此，哥白尼学说引起了人类宇宙观的巨大革命，并使人们对自然界的研究从宗教的束缚下解放出来；这个学说的出现，标志着近代自然科学的诞生，也为古典力学的发展开辟了道路。

哥白尼的日心地动说提出后，许多人对天体运行作了长时期的大量的观测。

1608年，荷兰的磨眼镜工人发明了望远镜。伽利略得知这一消息后，制成了放大到32倍的望远镜。他第一个把望远镜用于天文观测，获得了一系列使当时人们大为震惊的发现：月球表面有起伏不平的山谷，太阳表面有形状极不规则的黑子。这就彻底破除了关于不同于地球的“理想天球”的宗教观点。金星的相的变化现象，清楚地证实了它的绕日运行；木星的四个卫星的存在，推翻了只有地球是各个天体运转的中心的谬论。伽利略的这些重要发现，成为哥白尼学说的有力证明。

德国天文学家开普勒与当时丹麦天文学家第谷·布拉赫一起进行天文观测。第谷死后，开普勒对第谷的遗稿及大量观测记录进行了整理，发现火星绕日运行的轨道不是亚里士多德和托勒密所断言而又为哥白尼无条件地接受下来的严格的圆形。他通过进一步的辛勤的长期观测和极复杂的运算，在1609年得出火星轨道是椭圆形，太阳位于椭圆的一个焦点上，火星在其轨道上的运动速度不是均匀的等结论。

这一思想，在11世纪时托里多的阿萨拆尔就提出过，但他所据资料不足，到开普勒时则被完全证实。十年之后，1619年，开普勒又总结了第三定律。这样，开普勒相继发现了行星运动的三个定律：

第一定律 所有的行星分别在大小不同的椭圆轨道上围绕着太阳运行，太阳位于这些椭圆的一个焦点上。（轨道定律）

至于各个行星椭圆轨道的具体形状如何，则要根据它们的长、短半轴而定。一般说来，太阳系内各个行星轨道的长半轴和短半轴的长度都十分接近，所以太阳可以近似地看作是位于各行星轨道的中心，行星的轨道也可以近似地看作是圆形的。由此可见，第谷的观测和开普勒的进一步的观测与计算工作是十分精确的，他们由火星的实际轨道与正圆形的微小差异中，发现了自古以来的、甚至也被哥白尼完全接受的关于行星轨道传统观念的错误，对行星轨道的真实形状作出了较正确的几何描绘。

第二定律 每一行星的矢径（由太阳中心到行星中心连接的直线）在相等的时间内扫过相等的面积。（面积定律）

由这一定律可知，行星运动的线速度在轨道上的不同点处是不相等的。行星经过近日点（行星离太阳距离最小的位置）时线速度最大，而经过远日点（行星离太阳距离最大的位置）时线速度最小。

第三定律 行星绕太阳公转周期的平方与行星椭圆轨道的长半轴的立方成正比。（周期定律）

这一定律表明，轨道直径越大，行星公转的周期也越长。所以离太阳越远的行星，运转一周的时间也越长。

这样，由于开普勒的发现，终于对行星运动得出了正确的运动学方面的理论描述，并可以作出更为精确的天文学计算。开普勒三定律，成为牛顿作出定量的、动力学解释的观察基础。

开普勒的发现，吸引了许多人都来进行揣测和计算，企图找到下述这一

问题的答案：为什么行星要遵循椭圆轨道绕着太阳运转呢？矢径为什么在相同的时间内扫过相等的面积呢？其中有不少人猜想到这是由于某种力作用的结果。实际上，约 11 世纪初，西班牙的摩尔族人阿尔赫僧已经提及引力问题，并认为距离愈远则引力愈小。不过他认为这种引力只是局限于地球范围，并不存在于宇宙各处。伽利略也想到过使行星、卫星作它们的轨道运动必是由于某种力作用的结果。1650 年，海员兼罗盘制造工人罗伯·诺尔曼在研究磁现象时提出了引力概念。1600 年，英国医生威廉·吉尔伯特在《论磁体》一书中又假设“使行星维持在它们的轨道上是一种磁性的吸引力。”这都说明，引力的概念在当时已被许多人所接受。开普勒自己也曾探索过这个问题，他指出：行星是由于某种起源于太阳的作用力而沿黄道运动。他认为起源于太阳的力仅在行星运转的黄道面内直线传布，因此必随离太阳的距离的增加而减小，开普勒还正确地指出，行星运动的定律必是某种更普遍的定律的结果。但唯心论的观点阻止了他进一步去认识现象的本质；他同时又认为行星之所以环绕太阳运转，是由于太阳具有“运动的灵魂”，行星是在太阳“德性”的感召之下才有“意识”地运动起来的。1645 年，法国天文学家布里阿尔德奥作了一个假设：“开普勒力的减少，和离太阳的距离的平方成反比。”这是科学史上第一次提出平方反比关系的思想。1666 年，意大利物理学家玻列利根据对行星运动和木星的四个卫星的运动的观察指出：“天体之间必存在着一种使之相互接近的自然倾向力，”他把行星受到的这种力表征为从太阳作用到行星的“重力”；为了说明行星的椭圆轨道以及行星离太阳愈近时运行速度愈快，他指出此“重力”必随行星离太阳的距离的减小而增大，因此，这个“重力”是距离的幂的某种函数。

1673 年，惠更斯在研究摆的摆动现象中，阐明了离心力的向心力的一些重要特征，并且得出了向心加速度公式。他指出：如果一个物体以速度 V 在一个半径为 r 的圆周上运动时，它必受一个向心力的作用，此力产生的向心加速度为 V^2/r 。根据惠更斯所发现的这一公式，结合开普勒第三定律，就可简单而直接地推出行星运动中所受到的向心力依轨道半径的平方的倒数而变的结论。但惠更斯在研究行星的运动时，没有把向心力和吸引力看成是一个东西，错误地认为引力是物体机械运动的结果，而不是物体本身所固有的属性。

和牛顿同时代的，靠工读和给科学家波义耳作实验助手而成为实验物理学家的罗伯特·胡克已经觉察到了引力和地球上物体的重力本质上是相同的。1661 年后，胡克曾在山顶上和矿井作实验，企图找出物体的重量随物体离地心距离而变化的关系。这在当时的实验条件下当然是不可能的。但胡克正确地指出，行星运动的轨道曲线必由某种力所引起，并认为行星对太阳的倾向力可以从旋转中心具有某种吸引性质来解释。经过长期的观察，胡克提出了论述引力的三个假设：

“一，据我们在地球上的观察可知，一切天体都具有倾向其中心的吸引力，它不仅吸引其本身各部分，并且还吸引其作用范围内的其它天体。因此，不仅太阳和月亮对地球的形状和运动发生影响，而地球对太阳和月亮同样也有影响，连水星、金星、火星和木星对地球的运动都有影响；”

“二，凡是正在作简单直线运动的任何天体，在没有受到其它作用力使其倾斜，并使其沿着椭圆轨道、圆周或复杂的曲线运动之前，它将继续保持直线运动不变”；

“三，受到吸引力作用的物体，越靠近吸引中心，其吸引力也越大。至于此力数量级，在实验中我还未解决。一旦知道这一数量级，天文学就很容易解决天体运动的定律了。”

1680年1月6日，胡克在给牛顿的一封信中更明确提出了“吸引力与两中心间距离的平方成反比”的假设。

英国天文学家哈雷、数学家伦恩也在1679年近似地把行星绕太阳运行的轨道看作圆形，而由开普勒第三定律和惠更斯发现的向心力公式，证明了作用于各个行星的吸引力必与它们到太阳的距离的平方成反比。他们只是不能证明，行星沿椭圆轨道运行时所受的吸引力也遵从平方反比关系，以及它的逆问题：如果吸引力遵从平方反比关系，行星的运动轨道可以是椭圆的。

可见，在牛顿确立万有引力定律之前，已有不少有人在这一定律的探索上取得了重大进展。牛顿关于机械运动的三个基本定律的确立和以变数观念为基础的新的数学方法的形成，给牛顿解决万有引力定律的具体形式问题提供了有力的手段。因此，在这里简单谈一下变量数学的形成历史。

法国人微塔在16世纪末首先采用字母代替已知量和未知量，使所有的代数论证都符号化了。这不仅加速了计算，而且在理论研究中使用字母也很容易显示出各个物理量之间的规律性联系，从而直接展现出各种客观规律的本质内容。1614年，苏格兰的耐普尔发明了对数方法，这是计算方法的一次革新，在实用方面大大缩小和简化了由于商业、航海和天文学的发展而提出的大量计算任务。

随着资本主义的发展，从生产实践的战争需要而提出的关于天体运行规律、透镜的几何形状和聚光性能、弹道学、摆的振动以及矿山开采中地下排水和通风等一系列问题的研究，都要求从运动、变化和发展中来研究事物。因而，原来那此研究固定的量和固定的图形，反映相对静止和平衡状态的常量数学方法就力不胜任了。这就需要在数学中引进变数，向变量数学飞跃。就是在这样的历史条件下，适应于阶级斗争、生产斗争和科学实验的需要，以变数观念为基础的新的数学方法，逐渐产生出来。伽利略、开普勒、托里切利、笛卡儿、费尔玛、惠更斯和巴洛等人都对新的数学方法进行了研究。而笛卡儿和费尔玛关于解析几何的研究工作，成了数学发展中的转折点，他们把描述运动的函数关系和几何学中曲线问题的研究结合起来，把变数引进了数学，从而使运动和辩证法进入了数学。

在长期积累的大量研究成果的基础上，17世纪后半叶，牛顿直接从变速运动的物理模型中抽象出了微积分概念，莱布尼茨则从曲线的切线的研究中得出了微积分的概念。于是，作为变量数学的主要部分的微积分学和积分学，就初步建立起来，从而初步提供了反映事物运动和变化过程的数学方法，也使过去需要用特殊技巧分别处理的一些困难问题，获得了一般性的解决方法。

牛顿在假定太阳吸引各行星的力，地球吸引月球的力以及地球吸引地面上物体的重力都是同样性质的力，遵从着同样的规律的指导思想下，借助于微积分这一新的数学工具，严格地证明了开普勒的每一个定律分别说明了支配行星运动的力的一种特征：面积定律表明作用于行星的力是沿着行星和太阳的连线方向的。牛顿认为这个力只能是源于太阳的，轨道定律表明太阳作用于给定行星的力是吸引力，它与行星到太阳中心的距离的平方成反比；周期定律表明太阳对于不同行星的吸引力都遵从平方反比关系。牛顿在《自然

哲学的数学原理》中写道：

“在任何一曲线上运动的质点，如果它的半径指向一静止的或作匀速直线运动的点，且绕此点扫过与时间成正比的面积，则此质点必受有指向该点的向心力的作用。”

“如果环绕周期的平方与半径的立方成正比，则向心力与半径的平方成反比”。

由此，牛顿就由特殊到一般，从对天体运动规律的具体分析中得出了普遍的万有引力定律。这一定律可表述为：任何两个质点之间和相互吸引力的大小和它们的质量的乘积成正比，和它们之间的距离的平方成反比；其方向则沿两个质点的连线方向。

为了验证万有引力定律所表示的平方反比关系的正确性，牛顿直接运用这一定律将月球环绕地球运行的向心加速度和地面上物体的重力加速度从理论计算和实际观测两个方面进行了比较。首先，牛顿认为这两个加速度都是由于地球对月球和地面上物体的万有引力引起的。在《自然哲学的数学原理》中写道：“月球为重力所吸向地球，并且在这重力的作用下不断从其直线运动偏离出去而保持在它的轨道上；”“在地球上，重物的下落实由于这种引力的作用；”“使月球维持其轨道运动的引力，在月球下落至地面时，也就等于重力，所以我们也可叫它作重力，而在实际上也正是重力。”进而，牛顿指出，如果由万有引力定律所表示的平方反比关系是正确的。那么月球环绕地球运行的向心加速度与地面上物体的重力加速度之比，应等于地球半径的平方与月球到地心距离的平方之比。牛顿的这个推论由实际观测得到了证实。

从牛顿的手稿可知，他在 1666 年已经进行过月球绕地球运行的验证。但因当时他所利用的地球纬度的测定值是不精确的，因而地球半径的数值也是不精确的，计算出的结果与实际情况之间出现了较大的差异。1671 年，法国天文学家皮卡尔在巴黎北面由精密的大地测量测出地球的纬度是 69.1 英里，而不是 60 英里，从而计算出了地球（看作正球形）半径的较精确的数值。1675 年，英国皇家学会得知了皮卡尔的新测定值。1682 年后，牛顿运用这一测定值算出了月球到地心的距离约为地球半径的 60 倍，于是得出了月球环绕地球运行的向心加速度与地面上物体的重力加速度这两个观测值，在测量误差的范围内恰好和它们到地心的距离的平方成反比，从而证实了牛顿的发现。

对于存在着万有引力这一科学结论，人们很自然地会发问：既然地球上的物体之间存在着万有引力的相互作用，为什么人们却丝毫也觉察不出来呢？既然地球吸引着月亮，太阳吸引着地球和各个行星，为什么月亮不落向地球，而地球和各个行星也没有被吸引到太阳上去呢？

对于前一个问题，牛顿回答说：地面上“物体相互间作用的引力与地球吸引它们的重力相比较，正如前者的质量与后者的质量之比一样。因此，相互间的引力虽然存在，但由于它太小了，所以不能为人们所观察到。”

对于后一个问题，牛顿回答道，这完全是由于月亮环绕地球，地球以及各个行星环绕太阳以很大的速度运转的缘故。他指出，根据抛射体的运动，就很容易理解月亮和行星是可以在向心力作用下维持于固定轨道上运行的。如果在高山顶上水平地架起一尊大炮，用炮火把一枚炮弹平射出去，炮弹就会在重力作用下离开其发射时应走的水平直线，而在空中划出一条抛物线。

炮弹在落到地面以前，就会沿着这一曲线飞过一段距离。发射的速度越大，它落地前经过的距离就越远，弹道曲线的弯曲程度也减小。如果给予这颗炮弹以足够大的速度，以致弹道曲线始终和地面平行，那么这颗炮弹就不会落回地面，而会像月亮一样绕地球运转。

在万有引力的问题上，牛顿的具体贡献在于：

第一，他找到了万有引力定律的正确数学表达式；

第二，他确定了这一定律的普遍性。

在万有引力定律确立这后，牛顿就曾敏感地说到：“可以肯定，这种力量只能来自这样一个原因，它能穿过太阳和行星的中心，而不因此受到丝毫的减弱。”但他却没有，在当时也不可能去深入探讨引力的根源问题。

直到 20 世纪初，爱因斯坦在广义相对论中才对万有引力的几何特性作了一个说明，指出一切物质都以特殊的方式“歪曲”着时空，而这种“时空的弯曲”，正以万有引力的形式出现。随后，物理学界还提出了引力波和引力量子的假说来解释引力现象。这都有待于作进一步的理论和实验的研究。

牛顿发现万有引力定律，是经过尖锐的斗争和科学实践的验证，才于牛顿晚年和逝世以后逐渐得到普遍承认的。

关于地球形状的问题，成为牛顿理论的第一个重大考验。在运用万有引力定律解释出岁差现象（春分点西移的现象）时，牛顿提出，由于地球绕轴迅速地自转，赤道部分的物质就发生隆起，使地球成为两极稍扁的扁球体。赤道隆起部分与黄道成约 $23^{\circ}5'$ 的交角，一部分离太阳较近，另一部分离太阳较远，因而所受太阳的引力作用也不相同。同样，月球对地球赤道隆起部分也有这样的影响。太阳与月球的这种摄动作用，使地球自转轴的方向发生了缓慢的、周期性的移动，从而产生了岁差现象。这样，牛顿就从理论上推测到地球的形状在两极是扁平的。由于当时人们对于地球的构造还毫无所知，因而牛顿只能假定地球的密度是均匀的，从而近似地计算出地球的扁率为 $1/230$ 。但当时在欧洲科学界占统治地位的笛卡儿物理学派则持相反的观点。按照笛卡儿的学说，地球的形状在两极处应是伸长的。巴黎天文台长雅克·卡西尼及其他几个法国科学家不仅反对牛顿关于地球是扁圆的这一理论，而且以错误的实际测量经验断言，地球是椭圆的，并且以极轴为最长。

两种结论的争论，最后由进一步的实际的大地测量得到了解决。1735 年，巴黎科学院同时派出了两个测量远征队，一队赴赤道地区的别鲁安（在秘鲁），一队到纬度较高的拉普兰德。他们分别在两地的经度圈上各测量了等角的一段弧长。结果表明：纬度一度的长度，在赤道地区是 56737 法国古尺（每尺约合 1.949 米），而在极地则是 57419 法国古尺，比赤道地区长 1.5 公里，因而表明经度圈在两极处是扁平的这一结论；但由于测量结果有误，但计算结果在数值上和牛顿的理论推算结果的相差很大。直到 1810 年，经过新的精密测量，得知法国纬度一度之长的平均值为 57025 法国古尺，将此值与赤道地区测得的数值加以比较，求得地球扁率为 $1/334$ ，比较接近了牛顿的理论计算结果。

第二，在牛顿时代，彗星被人们看作是一种奇怪而神秘的现象，不相信它和别的行星一样遵循同样的力学规律。牛顿一反传统偏见，指出行星的运动规律同样可以应用于彗星。哈雷根据牛顿的这一论断，对 1682 年出现的大彗星（后被命名为哈雷彗星）的轨道进行计算，指出这一彗星和 1531 年、1607 年出现的大彗星是同一颗彗星。哈雷根据计算预言，这颗彗星将在 $3/4$ 个世

纪以后的 1758 年再次出现。1743 年，法国数学家克雷罗计算了遥远的行星（木星和土星）对哈雷慧星的摄动作用（即由于这些行星的引力作用而使哈雷慧星偏离其原来轨道的现象），指出这种摄动的影响，哈雷慧星的出现应稍稍推迟一些，它经过近日点的日期不在 1758 年，而在 1759 年 4 月份。果然，这一慧星于 1759 年又映辉于夜空，它经过近日点的日期与预算的日期只差一个月。这对牛顿力学原理的真理性和天体力学方法的可靠性，提供了一个有力证明。

第三，引力恒量的测定，从地面上的实验中直接证实了万有引力定律。

两个质量不大的物体间的引力是非常小。因此，牛顿万有引力定律的直接验证以及引力恒量的测定，是一个十分困难的实验问题。牛顿曾设想两种测定引力恒量的方法。第一种是测定悬挂于大山旁边的铅垂线由于受到大山物质的吸引而发生的偏向，来测定山的质量与地球质量的比值，进而计算出引力恒量之值；第二种方法就是直接测定两个物体之间的引力。但牛顿却根据计算错误地作出结论说，无论用哪一种方法，它的效果都是如此微弱，以致无法测量出来。牛顿之后的科学实践表明，这些测定方法都是可以实现的。

1750 年，法国数学家布格尔在南美洲厄瓜多尔的琴玻拉错山旁第一个利用铅垂线偏向法进行了测量，但由于恶劣的气候的影响，测量结果不够准确。此后，又有很多人利用这个方法进行了多次测量。但由于无法准确地量度山的密度，所以由这个方法所得结果的精确度是较差的。

根据牛顿提出的直接测量两个物体之间的引力的思想，1798 年英国物理学家开文迪士首次采用扭秤法较精确地测定了引力恒量之值。此后还有不少入先后不断改进了这一设计，反复进行了多次测量。

除了这两种方法之外，还有许多人采用其它方法对引力恒量的数值进行了大量测定，取得了越来越精确的测量结果。

第四，海王星的发现，是牛顿天体力学理论的一个辉煌的成就。

1781 年，英籍德国人威廉·赫舍尔发现了位于土星轨道之外的天王星，这在当时就被人们认为是距太阳最远的行星了。从 18 世纪末到 19 世纪初，人们对天王星的运动的观测和理论计算的结果之间存在着较大的偏差，并且这种偏差是重复地、有规则地出现的。天王星的运动的这种偏差，不能用距它最近的土星、木星的摄动作用作出解释。于是就使人们想到，这种偏离很可能是由于位于天王星轨道之外的，尚未被发现的另一个有规则地运动着的行星的摄动作用造成的。虽然从已知的行星去计算它的摄动作用这一问题人们已经解决了的，但是要解决与它相反的问题，即从已知的摄动效果去求未知的摄动星的质量、轨道和运动情况，这却是一个十分复杂而困难的问题。

英国年青的大学生亚当斯在 1843 年到 1845 年，法国天文台的勒维烈在 1845 年各自独立地根据牛顿力学原理进行了这一困难的复杂的计算工作，从而确定了这一未知行星的质量、轨道和位置。亚当斯的计算结果，在 1845 年 10 月 21 日送交给了英国格林威治天文台的天文学家艾里，但艾里却无视亚当斯这个“小人物”的计算，因而根本不打算用望远镜去寻找。1846 年 9 月 18 日，勒维烈写信给当时拥有详细星图的柏林天文台的加勒，信中写道：“请你把你们的天文望远镜指向黄经 326° 处的宝瓶座内的黄道的一点上，你就将在离此点约 1° 左右的区域内，发现一个圆而明显的新行星，它的光度约近于九等星”。加勒在接到信的当年即 1846 年 9 月 23 日夜，就在离

所指出的黄道点相差 52° 处发现了一颗前此未知的新星。第二天晚上又观察到这颗星相对于恒星背景有了移动，这正是一颗行星。这就是规则地对天王星产生摄动作用的海王星。海王星的发现，不仅证实了牛顿力学原理的正确性，而且也完全证实了哥白尼太阳系学说的真实性。

1930 年，根据类似的计算，天文学家洛威耳又发现了一颗行星——冥王星，它距太阳比海王星还远。

牛顿万有引力定律得到人们确认的历史，生动地证明了：只有通过实践，才能够发现真理，也只有通过实践，才能够检验真理和发展真理。

弹性碰撞问题

17 世纪中叶，碰撞问题成了科学界共同关心的课题。当时刚建立起来的英国皇家学会决定要在实验上、理论上弄清碰撞的规律，便向几位科学家悬赏征文。有三位科学家应征提交论文，他们是瓦利斯、雷恩、惠更斯。

第一个把研究成果递交给皇家学会的是英国数学家瓦利斯。他主要考查非弹性体沿它们重心连线运动时的碰撞，但在论文中也讨论了斜碰撞的情形。在此之后，还发表了关于弹性碰撞的结果。

在最初推导公式时，瓦利斯就应用了在笛卡儿著作中已出现的“运动量”的概念。他认为推动一个给定物体所需的作用力，与该物体的大小和速度成正比。

如果设两个碰撞物体为 m_1 和 m_2 ，它们碰撞前各自的速度变为 V_1 和 V_2 ，碰撞后的公共速度为 μ ，则瓦利斯得到的结果为：

当这两个物体开始同向运动时

$$\mu = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

当这两个物体开始相向运动时

$$\mu = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

第二个递交研究结果的是英国建筑学家雷恩，他是英国皇家学会的创始会员之一，并以圣保罗大教堂和这一时期许多其它公共建筑的建筑师而著称。他主要通过和鲁克一起做的悬置物实验，发现了弹性碰撞的经验定律，但是他没有能从理论上推导出它们。

第三个递交研究结果的是荷兰的惠更斯，他是英国皇家学会的第一个外国会员。虽然他的论文最迟递交，但内容最完整。可惜的是这篇应征论文当时没有公开刊登。惠更斯的碰撞理论是在他死后出版的《物体碰撞运动》一书中，才首次被人发现。

惠更斯主要研究和论述了弹性体的对心碰撞。所谓对心碰撞，就是两个物体在碰撞前，是沿着联结两物体中心的直线运动的。

作为论述碰撞运动的基础，他提出下述三条公理：

(1) “运动起来的物体，在未受到阻碍作用时，将以不变的速度沿直线继续运动。”显然，这就是惯性原理。

(2) “相等的两个物体以大小相等方向相反的速度碰撞时，它们以同样的速度弹回。”根据这个公理，惠更斯把研究范围局限在弹性碰撞问题上。

(3) “物体的运动以及它们的速度，必须看作是相对于另一些我们认为静止的物体而言的，而不必考虑这些物体是否还参与另外的共同运动。因此，当两个物体相碰撞时，即使它们同时参与另一匀速运动，在也具有这个共同运动的观察者看来，两个物体的相互作用就好像不存在这个共同运动一样。”这是运动相对性原理，惠更斯碰撞理论的特点是彻底地应用了运动相对性。

根据这三条公理，惠更斯作出断言，两个质量相同并以相同的速度相向运动的物体，在发生对心碰撞之后，都保留碰撞前的速度而相互弹开。这个结论为实验所证实。

接着，惠更斯研究了两个质量相同的物体以不同的速度发生对心碰撞的情形。这里，他独具匠心地运用了相对性原理：想象一个人站在以速度 μ 作匀速运动的船上，用吊起的两个相同的钢球作碰撞实验。

对船而言，两球以同样的速度 μ 相接近而碰撞。根据公理（3），船上的人所看到的就是平时所看到的那种最简单的碰撞，在碰撞后（对船而言）两球将保持碰撞前的速度而被弹开。

这个过程对于站在岸上的人来说，两球是以不同的速度 $(v+u)$ 和 $(v-u)$ 相向碰撞的，碰撞后两球的速度则分别变为 $(v-u)$ 和 $(v+u)$ 于是可得出结论：两个相同的球以不同的速度发生对心碰撞后，将彼此交换速度。

当然，最一般的情形是两个质量不同、运动速度也不同的物体的对心碰撞。为了处理这类问题，惠更斯提出了两条假设：

（1）“一个较大的物体如果碰撞另一个静止的较小的物体，较大的物体就会给较小的物体以某个速度，自己的速度减少。”

（2）“两个碰撞物体，如果一方的速度绝对值不变的话，那么另一方也不会改变。”

从假设（1）中可以得出这样的推论：较小的物体在碰撞静止的较大物体时，前者也会给后者某些速度。为了说明这个问题，惠更斯认为，可以把运动的较小物体移到速度看作为零的船上，这样就可以证明：两个物体的相对速度在碰撞前后，只改变符号，而不改变其绝对值。

如以较大物体静止时的情况为例，即 $m_2 > m_1$, $\mu_2 = 0$, μ 表示碰撞的速度， v 表示碰撞后的速度。由于碰撞，较大物体得到的速度 $v_2 > 0$ 。

假如把上述试验移到相对于河岸速度为 $v_2/2$ 的船上进行，则较小物体和较大物体相对于岸的速度为

$$\text{碰撞前 } \mu_1 - \frac{v_1}{2} \text{ 及 } -\frac{v_2}{2} (\ominus \mu_2 = 0)$$

$$\text{碰撞后, } v_1 - \frac{v_1}{2} \text{ 及 } -\frac{v_2}{2}$$

即较大物体速度的绝对值不变，所以根据假设（2），较小物体速度的绝对值也不变，于是

$$\mu_1 - \frac{v_1}{2} = \frac{v_2}{2} - v_1$$

$$\text{或 } v_2 - v_1 = \mu_1$$

可是，因为假设较大物体在碰撞前是静止的（相对船来讲），所以

$$\mu_1 = (\mu_2 - \mu_1)$$

则得

$$v_2 - v_1 = -(\mu_2 - \mu_1)$$

从而，相对速度只改变符号而不改变绝对值。相对于河岸的速度也可以同样说明。只要选择适当的船的速度，就能很简单地把上述结果推广到最初不是处于静止状态的较大物体的情形。不妨请你自己试一试。

惠更斯以这些结果为基础，在碰撞问题的研究中进一步得出了许多重要的定理。他在应征论文中写道：“两个物体所具有的运动量在碰撞中都可以增多或减少，但是它们的量值在同一方向的总和却保持不变，如果减去反方向的运动量的话。”

他还指出，“两个、三个或任意多个物体的共同重心，在碰撞前后总是朝着同一方向作匀速直线运动”。这已是较完善的动量守恒定律的表述。惠更斯既看到了动量数量的变化，又强调了方向的问题，实际上是把矢量概念引进了力学，从而为牛顿三大运动定律的提出和矢量力学的建立作了概念的准备，这是力学思想的一个重大进步。

在另一个定律中，惠更斯写道：“在两个物体的碰撞中，它们的质量和速度平方乘积的总和，在碰撞前后保持不变。”这已是完全弹性碰撞中机械能守恒定律的最初表述，在相当一段时间内曾被称为“活力守恒”。

我们不免要为惠更斯如此全面、如此精湛的研究成果肃然起敬，因此他理所当然地成为这次悬赏征文的得奖者。

据说，惠更斯从1652年就开始研究弹性物体的碰撞，到1668年参加悬赏征文，其间有长达16年之久的研究生涯，这为他全面、精湛地解决碰撞问题，无疑奠定了坚实的基础。

有了这个基础，再加上惠更斯既重实验，又重推理，还善于运用数学工具透彻地解决问题，更是如虎添翼。

1637年，布拉格大学校长——物理学教授马尔西在他的著作《运动的比例》中，发表了他研究碰撞问题的一些成果。

当时这位马尔西教授在描述碰撞现象时，专门画了一尊大炮，使人感到十分奇特，也令人难以思议。

从马尔西大炮图中，可以观察到物体运动所发生变化的序列（已理想化）：一个大理石球对心撞击一排大小相等的大理石球，运动将传递给最后一个球，中间的球一点也不受影响，就像第一个球直接撞到最后一个球那样。

也就是说，第一个大理石球静止于桌面，另一个具有相等质量的大理石球水平的射向第一个球，两球相撞，当第一个球以第二个球射来的速度飞离桌面时，第二个球则停留在桌面上。

这表明马尔西教授已知道，一个物体与另一个大小相同的处于静止状态的物体作弹性碰撞，就会失去自己的运动，而把速度等量地交给另一物体。

至于今天，我们可以直接根据牛顿第三定律或动量守恒定律来解释上述的碰撞现象。

(1) 根据牛顿第三定律，在两球接触这个短暂的时间间隔 t 内，相互作用力大小相等，方向相反。所以作用在球 A 上的减速力（制动力）等于作用在球 B 上的加速力，而且由于这两个球的质量相等，这样其中一个球的实际减速度等于另一个球的加速度。

假如球 A 失去它的全部速率且全为球 B 所得，则球 B 得到的速率等于球 A 失去的速度，亦即

$$v_B = v_A$$

(2) 根据动量守恒定律，这两个球组成一个封闭系统，因为影响这一现象的仅仅是两球之间的相互作用力。于是

$$\text{碰撞前的动量: } \sum \vec{P} = m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B$$

$$\text{碰撞后的动量: } \sum \vec{P}' = m_A \vec{v}'_A + m_B \vec{v}'_B$$

$$\sum \vec{P} = \sum \vec{P}'$$

因所有矢量都位于同一直线且具有同一方向，则矢量加法在这里就变成代数加法。代入已知数据便得

$$m_A V_A + m_B \times 0 = m_A \times 0 + m_B V_B$$

$$v_B' = \frac{m_A}{m_B} v_A$$

$$m_A = m_B$$

$$v_B = v_A$$

两种方法，一个结果。这个结果和马尔西教授的实验研究相一致，并且是定量分析的结果，当然更加准确和深入。

无疑，马尔西教授用大炮的轰击来描述这现象，确实有点令人惊奇。因此，也许更可靠的是他画的第二张图，用棍子击弹子球。不过，他没有得出理论上的分析。

动量守恒定律

动量守恒和动能守恒的规律是在牛顿时代发现的两条重要定律。它们和牛顿定律既有联系，又有区别。“守恒”概念的建立无疑是科学思想发展史上的一个非常重要的成就，对于人们认识自然来说，守恒定律实际上比牛顿定律有更为深远的意义。

明确的运动守恒的思想最早出现在 17 世纪哲学家法国笛卡尔所著的《哲学原理》一书中，该书中有下面一段话：

万物运动的普遍的原因很明显地只能是上帝。他在创世开始时创造了万物，并赋予它们以运动和静止，而且直到现在，由于他的简单而平凡的协助，仍在整体上保持着他在开始时所创造的那么多运动和静止的量。尽管运动仅仅是运动物质的一种状态，但是在物质中仍然存在一个确定的量，这个量就宇宙总体来说永不增加或减少，虽然对某一单独部分它可能变化。

尽管把原因归之于上帝，但这里笛卡尔是很明确地表达了“宇宙中运动量守恒”的思想。

表示运动多少的这一“确定的量”是什么呢？笛卡尔认为是“物质的量”（笛卡尔对质量的意义并没有清楚的概念）和运动的“快慢”的乘积。用他的话说：“一块物质的运动比另一块的运动快两倍，但它的量只是另一个的一半，这两块物质具有同样的运动量。”

笛卡尔曾用几个命题来说明他的“运动守恒”的规律性。例如，他的一个命题是：“如果物 A 和物 B 相遇，并且吸引住物 B，则 A 失去多少运动，物 B 在这次相遇时，从物 A 也得了多少运动。”这是一个完全非弹性碰撞。如果是 A 追赶 B 而发生碰撞，笛卡尔的命题是对的。另一个命题：“如果两物如 A 和 B 全等，并且以同样的快慢做面对面的运动，当其相遇时，两物都会向反向射回，而其快慢不变。”如果这是指的两个物体的完全弹性碰撞，笛卡尔的命题也是对的。

但是，用现今科学的观点来审查哲学家笛卡尔的“运动守恒定律”时，就会发现他有严重的错误。这就是他在考虑“运动量”时不考虑运动的方向。他说：“方向不属于运动的本质。”因此，他的“运动量”，用现代的语言说，是物体的质量和速率的乘积。这样，他举出的另一些命题，虽然按他的运动量概念，运动是守恒的，但实际上并不能发生。例如，他的另一个命题是：“如果两物体 A 和 B 的量相等，而 B 的运动稍快于 A，则二者做面对面的运动而相遇时，不仅 A 被射回相反的方向，并且 B 还把自己所多的速度的一半给予 A，两物皆以相等的速度朝一个方向运动。”在这个命题中，“笛卡尔运动量”在相遇前后是守恒的，都是 $m(V_A + V_B)$ 。但是实际上并不能发生，因为它至少违反了我们知道的正确的动量守恒定律。

笛卡尔所以发生这样的错误，从思想方法上讲，是因为他过于相信自己的观念或“理性”，而忽视感性知识和实际经验，其实，只要做些很简单的实验就可以发现他用质量和速度的乘积表示运动量来说明运动守恒是错误的。例如，两个相同的泥块以相同的速率相向运动而相遇时，最后都要停下来。这样经过碰撞，两个物体的“笛卡尔运动量”都消失了，显然是违背他自己的命题的。惠更斯首先注意到了这一点，而牛顿则更为明确地纠正了笛卡尔的错误。

最早用实验来系统地研究物体碰撞规律的是瓦里斯、雷恩和惠更斯。他

们分别于 1668 年和 1669 年受邀向伦敦皇家学会写过有关的报告，并且雷恩还在皇家学会当众演示过单摆球的相向碰撞实验以证实他的关于碰撞的理论，并且他们的结论是一致的。瓦里斯和雷恩只说明碰撞的某些特点，惠更斯则对问题进行了完整而详尽的分析。

瓦里斯只研究了完全非弹性碰撞，他指出碰撞中的决定因素是动量，即质量和速度的乘积。如果两个动量相同的非弹性物体相向碰撞，结果将是二者静止。如果它们的动量不同，碰撞后的动量将是二者原来的动量之差。用这个差除以二者的质量之和，就可以得到碰撞后的速度。用现在的通用符号表示，质量分别为 m_1 和 m_2 的两物体碰撞后的速度 V 就应该是

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

其中 V_1 和 V_2 分别表示两物体碰撞前的速度。由于 V_1 和 V_2 方向相反，所以应取不同的正负号。因而上式中的 $m_1 v_1 + m_2 v_2$ 实际上是求二动量数值之差。计算两个物体的总动量时，已考虑到要根据它们的方向不同而取不同的符号，这表明瓦里斯已认识到动量应该是个有方向的量，即现今叫做矢量的一种物理量。

惠更斯是荷兰数学家、物理学家和天文学家。1629 年生于海牙，1655 年获法学博士学位，但以后转入科学研究，并取得多方面的成就。1663 年成为伦敦皇家学会第一个外国会员，以后又成为当时法国科学院唯一的外国院士。在物理学方面，他解决了求物理摆的摆动中心问题；测定了重力加速度值；改进了摆钟；得出了离心力公式；研究了光的波动理论等。

惠更斯对完全弹性碰撞作了全面、详尽的研究，但他的论文《论碰撞作用下物体的运动》当时没有公开发表，是在他死后于 1703 年作为遗作发表的。

惠更斯发现两个质量相同的弹性体（他的实验中用的硬质木球就很近似）以大小相等而方向相反的速度碰撞时，将以同样的速度分开。他还发现，在

两个弹性体碰撞前后，以 $\frac{1}{2}mv^2$ 表示的“活力”（现在叫动能）的总量是不变的。他把这些做为基本假设，再利用速度的相对概念，推导出了许多有趣的正确的结果。下面举两个例子。

（1）两个相同的弹性体碰撞时将交换速度

设想在一个小船上做实验，使两个相同的弹性球以大小相等、方向相反的速度 v 相碰，碰后二者以原速返回。今设船速度 v 均匀前进，当人站在岸上观察两小球的速度时，根据速度的合成，在碰前，二球的速度应分别为 $2v$ 和 0 ；在碰后，二球的速度分别变成为 0 和 $2v$ ，即二球碰撞时交换了速度。如果船以速度 u 进行，则在岸上观察时，二球碰前的速度就分别为 $u+v$ 和 $u-v$ ，而碰后应为 $u-v$ 和 $u+v$ ，还是交换了速度。在所有这些情况下，无论在船上和在岸上观察，经过碰撞两球的总动量（考虑到速度的方向）都是保持不变的。

（2）两个弹性体在碰撞前后的相对速度是相等的

设想在一个小船上做实验，使一个质量为 m ，速度为 v 的物体和一个质量为 M 而静止的物体发生碰撞。碰撞以后， M 的速度设为 w 。今设船沿和 v

相反的方向以速度 $w/2$ 均匀行进。则在岸上看来， m 和 M 碰前的速度分别为 $v-w/2$ 和 $-w/2$ ；在碰撞后， M 的速度变为 $+w/2$ ； m 的速度设为 x 。这样， M 的速度就只是改变了符号而数值不变。根据“活力”的守恒关系，有

$$\frac{1}{2}M(v-w/2)^2 + \frac{1}{2}M(-w/2)^2 = \frac{1}{2}mx^2 + \frac{1}{2}M(+w/2)^2$$

或此式可知，经过碰撞， m 的速度也只能是改变符号而数值不变，即 $x = -(v-w/2)$ ，因而碰撞后两物体的速度分别为 $-(v-w/2)$ 和 $+w/2$ 。因此，碰撞前二者相互接近的速度为 $(v-w/2) - (-w/2) = v$ ，就和碰撞后二者相互分离的速度 $-(v-w/2) - (+w/2) = -v$ 相等（除了符号的不同）。由于速度的相对性，这一结果应该不只是在岸上看，即使在船上，也是正确的。它也是关于弹性碰撞的一个普遍的结论。

前面曾讲过，牛顿也曾用两个单摆仔细研究了物体碰撞的规律，得出的结论是两个物体经过碰撞在相反的方向上产生相等的动量变化。这实际上也就是说两个物体在碰撞过程中动量是守恒的。他把这个结果作为建立第三运动定律的一个根据。反过来，以第二、第三运动定律为基本定律也可以一般地解决碰撞问题，得出瓦里斯和惠更斯的所有结果。

首先，可以根据第二和第三两条运动定律导出动量守恒的结果。经 m_1 和 m_2 分别表示两物体的质量，以 v_1 和 v_2 分别表示它们在碰撞的速度（设沿一条直线）。以 v_1' 和 v_2' 分别表示二者碰撞后的速度（沿碰撞前的同一条直线），以 F_1 和 F_2 分别表示碰撞过程中二者各自受对方的作用力，以 t 表示碰撞过程的时间，则在没有另外的物体对它们作用情况下，对二者分别应用牛顿第二定律，就有：对 m_1 ，

$$F_1 = \frac{m_1 v_1' - m_1 v_1}{t}$$

对 m_2 ，

$$F_2 = \frac{m_2 v_2' - m_2 v_2}{t}$$

根据牛顿第三定律， F_1 和 F_2 的大小相等，方向相反，即

$$F_1 = -F_2$$

将上两式代入此式，消去 t 可得

$$m_1 v_1' - m_1 v_1 = - (m_2 v_2' - m_2 v_2) \text{ 或者写成 } m_1 v_1' - m_2 v_2' = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

这就是说，在没有其他外力的作用下，这两个物体的总动量在碰撞过程中是守恒的。这就是动量守恒定律。

牛顿在《原理》中，曾作了上述的论证，并把其结论作为运动定律的第三个推论明确地写成：对于一组物体来说，用同方向的动量相加和反方向的动量相减的方法求得的总动量不会由于各物体之间的相互作用而发生变化。

由于在上面的推导中，对 F_1 和 F_2 的性质未加任何限制，不管是弹性力或非弹性力均可。因此动量守恒的结论对于任何两物体（即不管是否弹性球）的碰撞都是适用的。在完全非弹性的情况下，碰撞后两物体将以同一速度 v （ $=v_1 = v_2$ ）运动。根据上式就可得

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

这就是瓦里斯的公式。

对于弹性碰撞，两物体碰撞后的速度不同，但也可以用第二定律进一步求解。为此可以把碰撞过程分成两个阶段，前一阶段是两个物体从接触到由于相互挤压而形变达到最大的阶段。在这一阶段末尾二者的相对速度为 0，即以同一速度 u 运动。根据动量守恒定律，有

$$m_1 u + m_2 u = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

$$\text{或} \quad u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

在这一阶段里， m_1 的速度减小了 $v_1 - u$ ，而 m_2 的速度增加了 $u - v_2$ 。

碰撞的后一阶段是由于物体的弹性而产生相互排斥，使二者形状逐渐复原，最后相互分离，各自速度达成 v_1 、 v_2 的阶段。物体具有弹性意味着这后一阶段里的相互作用力经过和前一阶段里的相同的演变，只是次序相反罢了。因而各自发生的速度改变也和前一阶段一样，即在后一阶段里， m_1 的速度又减小了 $v_1 - u$ ，而 m_2 的速度又增加了 $u - v_2$ 。因而经过这两个阶段后， m_1 和 m_2 的速度就分别变成了

$$v_1' = v_1 - 2(v_1 - u) = 2u - v_1$$

$$v_2' = v_2 + 2(u - v_2) = 2u - v_2$$

将上面求出的 u 值代入此二式，可得

$$v_1' = \frac{m_1 v_1 + m_2 (2v_2 - v_1)}{m_1 + m_2}$$

$$v_2' = \frac{m_2 v_2 + m_1 (2v_1 - v_2)}{m_1 + m_2}$$

在这两个结果中，如果 $m_1 = m_2$ ，即两个相同的弹性体发生碰撞后，则 $v_1' = v_2$ ， $v_2' = v_1$ ，即二者交换了速度。也很容易证明 $v_1' - v_2' = v_2 - v_1$ ，即碰撞前后两物体的相对速度相同。利用上面两个结果还可以证明，不但有

$$m_1 v_1' + m_2 v_2' = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

即整个碰撞过程前后动量守恒，而且有

$$\frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

即弹性体碰撞前后，它们的“活力”是守恒的。这些都是惠更斯的基本假设或他推出的结论。

这样，我们根据牛顿定律导出了瓦里斯和惠更斯的全部结果，这就显示了牛顿定律作为力学的统一的基本定律的概括性。这也说明牛顿比他的同代人更深刻地掌握了力学现象的规律。

机械能守恒定律

在动量和动量守恒概念发展的同时，能量和能量守恒也发展起来了。上面讲过，笛卡尔为了表述他的运动守恒概念，以质量和速度的乘积（ mv ）作为运动的量度。如果改正了笛卡尔不考虑速度方向的错误，我们可发现，在碰撞过程中， mv 这一乘积的总和的确是守恒的。笛卡尔的这种运动的量度的思想来自伽利略。伽利略曾把一个运动物体的“力”叫做“动量”（有的他也称为“冲量”和“能力”），并认为它和物体的质量（伽利略的质量概念实际上还是重量）和速度的乘积成正比。伽利略曾指出，物体自由下落，经过一段时间下落一定高度后，获得一定的速度。由于这一速度，物体仍可在相同时间内上升到原来的高度。由于自由下落的物体获得的速度和下落时间成正比，因此，当物体获得一定的竖直速度后，能持续上升的时间就和这速度成正比。这样，如果认为能上升的时间越长，物体最初的“运动量”越大，则这一运动量就应该和速度成正比，这就是伽利略—笛卡尔“动量”概念的来源。

但是，也可以有另一种想法，即认为物体能上升的越高，它最初的“运动量”越大。由于物体自由下落的高度和它下落此高度后所获得的速度的平方成正比，因此物体获得一定的竖直速度后能上升的高度就和这速度的平方成正比。以上升的高度来区别运动量时，就应该用 mv^2 作为运动的量度。惠更斯就这样想过，而他的同代人德国的莱布尼兹则更坚持只有 mv^2 才是运动的“真正的量度”。他把它叫做“活力”（现代物理学中把它的一半，即 mv^2 叫做动能），他坚持自然界的运动不灭应该用“活力”守恒来说明。他还指出，永动机的不可能造成，只有在接受“活力”是运动的量度时才能加以说明。

莱布尼兹的活力守恒概念在当时的力学现象中也得到了验证，那就是上面提到过的弹性碰撞。对非弹性碰撞，动量是守恒的（这对笛卡尔派有利），但是，活力总是减少的。莱布尼兹仍坚信活力是守恒的，为了说明在非弹性碰撞中活力并没有减少，他提出了一个巧妙的解释，即认为碰撞物体在整体上所减少的活力，并未消失，只不过是分散到组成它们的各个“小部分”中去了。莱布尼兹当时当然没有现代分子原子概念，他的这种解释纯属设想，但是却符合了近代分子运动论的观点——碰撞物体整体的动能变成了热能，即内部分子运动的动能。

莱布尼兹还把他的活力守恒思想推广到碰撞以外的问题中。他看到当石头以一定初速竖直上抛时，它的速度随高度而减少，因而它的活力 mv^2 也就随高度而减少，到达最高点时活力变为零；然后回落，活力又逐渐增大，最后又可恢复原来的活力数值。对上抛过程中活力的显然减少，莱布尼兹仍坚持并未消失而是以某种形式被储存起来了，当物体回落时，这储存的活力又被释放了出来。由此可以看出，莱布尼兹的运动守恒的信念何等牢固！他的这种活力被储存起来的想法是后来的势能概念的先声。

势能概念的萌芽还可以上溯到伽利略，如上一章所述，伽利略已指出，一个单摆球，从某一高度下落到最低点时，获得一定的速度。由于这一速度，摆球还可以回升到原来的高度。惠更斯发展了这一论断。并指出：对由一组质点作成的摆，不管各质点之间有什么相互作用，下落时各质点的速度只能

是这样，即当它们凭借这些速度而回升时（不管分开与否），它们的重心 S 刚好能回复到原来下落开始时的高度。他得出这一结论是根据下述假设，即重物不能自行升高，这一点当时人们都是承认的。利用惠更斯的概念把下落高度 h 和质点获得速度 v 联系起来，对一个质点组可以得出下面的结果。

各质点从不同高度下落，它们的重心下落的距离为

$$ph / p$$

式中 p 表示各个摆球的重量、各质点再以下落的最终速率 v 回升；当它们都达到最高点时，重心升高的距离为

$$p \frac{v^2}{2g} / p$$

这两个距离相等就给出

$$ph / p \frac{v^2}{2g}$$

由于 $p=mg$ ，上式又可写成

$$ph = \frac{1}{2} mv^2$$

这就是最初的特殊形式的功能关系。后来约翰和丹尼尔·伯努利把这一关系推广了。如果质点初速不为零，而是 v_0 ，则上式右侧应为活力的增量，即

$$ph = \frac{1}{2} m(v^2 - v_0^2)$$

进一步，p 可以不是各质点的重量，而是作用在质点上的任意的力 f，h 也不是高度，而是沿力的方向质点移动的距离 s，这时上式仍成立，即

$$fs = \left(\frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2 \right)$$

此式左侧就是外力对各质点所做的功之和，右侧就是各质点的动能增量之和。这个式子就是现代形式下的动能定理。

上述动能定理，可以由牛顿第二定律推导出来，考虑一个质点在恒力 f 的作用下移动距离 s，力对质做的功为 fs，由牛顿第二定律 $f=ma$ ，又由于恒力作用下的运动是匀加速运动，因而 $v_2 - v_0^2 = 2as$ ，或 $s = \frac{1}{2a} (v_2 - v_0^2)$ 。

这样

$$fs = mas = \frac{1}{2} m(v^2 - v_0^2)$$

这就是用于一个质点的动能定理，对许多质点的类似公式相加，我们就得到上面的动能定理表示式。

在应用动能定理时，要求出动能或速度的变化，必须知道各物体经过的全部路径以及在路径上各处力的作用情况，这样才能求出功来。但是在有些情况下，却无需知道质点所经过的实际路径，这一点甚至伽利略也有一些了解。他知道一个重物下落的速度只决定于下落的竖直高度，而与下落时实际经过的路径形状无关。惠更斯把这一点应用于质点组的下落，指出质点组下落时得到的动能只与它们下落的竖直高度有关。欧拉更进一步指出，一个质点在有心力（质点受的力的方向总指向某一点时，此力叫有心力，此点叫做

力心。两个物质质点之间万有引力，两个点电荷之间的电力都是有心力)的作用下移动时，质点K受到指向C点的有心力作用而由A运动到B时，它的动能增量只决定于开始和终了时质点离C点的距离 r_0 和 r_1 ，而与实际的路径形状(如AB)无关。这是因为在路径AB上任一小段距离ab内它所受的有心力做的功，就等于该力乘以ab在半径方向的投影ac。所以从A到B，有心力做功的实际“有效”的距离就是 r_0 和 r_1 之差，因而做的功就决定于这两个半径 r_1 和 r_0 ，而和经过的曲线的形状无关。这也就是说，在上述有心力的情况下，只要知道了开始和终了的质点的位置，就可以算出功的大小，而无须考虑实际路径如何。在这种有心力作用下质点运动时，由动能定理可知，它的动能的增量也就只决定于开始和终了的位置，而与运动经过的路径无关了。丹尼尔·伯努利更进一步指出：一组质点在相互的引力作用下运动时，它们的总的动能的增量只决定于这些质点在开始和终了时的相对位置，而与各质点实际运动的路径无关。当质点组的相对位置复原时，它们的动能也就恢复到原有数值了。在这种思想的基础上，联系莱布尼兹的“活力被储存起来”的思想，就逐渐形成了势能的概念。这种概念经过拉格朗日、拉普拉斯、高斯、哈密顿等人的发展，最后成了一整套严整的关于力函数或势的理论。

我们下面来简单介绍一下势能概念的引入和机械能守恒定律。

力做的功与路径的形状无关时，这种力就叫保守力，重力、弹力、万有引力、静电吸力和斥力都是保守力。对于保守力，可以用它做的功来定义势能。保守力做的功等于相互以此保守力作用的质点组的势能的减少。以重力为例，当物体由高为 h_A 处，下落到高度为 h_B 处的过程中，重力做的功和竖直地由 h_A 高度下落到 h_B 高度时做的功相等。由于重力的数值不变，等于 mg ，所以这功等于

$$W_{A \rightarrow B} = mg(h_A - h_B) = mgh_A - mgh_B$$

以 E_{pA} 和 E_{pB} 分别表示物体在 h_A 高度和 h_B 高度时的势能，则根据上面定义的势能和功的关系，则功 $W_{A \rightarrow B}$ 应等于物体的势能的减少，即

$$W_{A \rightarrow B} = E_{pA} - E_{pB}$$

将上两式相比，可得

$$E_{pA} - E_{pB} = mgh_A - mgh_B$$

因此，在高度 h 处的物体的重力势能就可以写成

$$E_p = mgh$$

由于高度 h 值是相对的，决定于以哪一个高度为基准，因此，重力势能也是相对的，它的数值也决定于高度基准的选择。通常就以地面为基准高度，而物体放在地面上时的重力势能就是零。要特别注意的是，只是因为重力是保守力，所以才能建立重力势能的概念，否则，说物体在某一高度具有确定的势能(相对于基准高度)是完全没有意义的。

如果物体只有重力作用下运动，根据动能定理，它由高度 h_A 落到高度 h_B 的过程中重力做的功 $W_{A \rightarrow B}$ 和动能应有以下关系

$$W_{A \rightarrow B} = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2$$

因为 $W_{A \rightarrow B} = E_{pA} - E_{pB}$

$$E_{pA} - E_{pB} = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2$$

或者移项写成

$$\frac{1}{2}mv_A^2 + E_{pA} = \frac{1}{2}mv_B^2 + E_{pB}$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B$$

此式两侧均为动能和势能之和，这个和叫做物体的机械能。此式说明，物体只有重力作用下运动时，它在各个时刻的机械能都是相等的、不变的，这就是机械能守恒定律。

可以证明，弹力也是保守力。当弹簧的伸长从 s_A 变化到 s_B 时，弹力做的功为

$$W_{A \rightarrow B} = \frac{1}{2}ks_A^2 - \frac{1}{2}ks_B^2$$

式中 k 是弹簧的倔强系数，此式表明弹力的功与弹簧的长度变化的过程无关，只决定开始和终了弹簧的伸长 s_A 和 s_B ，因而弹力是保守力。用保守力的功和势能变化的关系

$$W_{A \rightarrow B} = E_{pA} - E_{pB}$$

可知弹性势能可写作

$$E_p = \frac{1}{2}ks^2$$

注意，式中 s 是弹簧相对于原长的伸长，并非弹簧的总长。把弹簧一端固定，另一端拴一小球，使之在水平上振动时，弹簧的弹性势能和小球的动能的总和也保持不变，这也是机械能守恒的一个例子。

由上面的两个例子可知，机械能守恒定律是动能定理在只有保守力作用下的一种特殊形式，因而也是牛顿定律的一个推论。这里，我们再一次看到了牛顿定律作为力学基本定律的概括性。

力学的应用

把万户的幻想变成现实

本世纪来，随着火箭的发明，人们企图上天的幻想变成现实。人造卫星、宇宙飞船、天空实验室和航天飞机的问世，更是对空间科学及至整个人类社会产生了深远的和不可估量的影响。

什么是火箭？一般是指以固体火药为发射剂，借反作用原理而自行发射的装置。用布劳恩的话说，火箭是按牛顿第三定律而工作的反作用装置。

而一提起火箭，全世界都公认是我国最先发明的。自三国时期起，我国史籍上已有关于火箭的记载。如在《魏略》（辑本）中载：诸葛亮“进兵攻（司马）昭，起云梯冲车以临城，昭于是以火箭逆射其云梯，梯然（燃），梯上之人皆烧死。”

不过，在当时的火攻中，虽说已有了“火箭”的名称，但它只是在箭头上附着油脂、松香、硫磺之类易燃物质，点燃发射出去以引起对方燃烧，实际上是一种带火的箭。

由火药喷射推进的火箭的发明年代，有人认为在我国唐末宋初。据《东京梦华录》载，当时宋代兵士在御前表演火药百戏的情景：

“忽作一声霹雳，谓之爆仗，则蛮脾者引退，烟火大起。……又爆仗一声，有假面长髯、展裹绿袍靴筒、如钟馗像者。……又爆仗响，有烟火就涌出。……忽有爆仗响，又复烟火出，散处如青幕围绕，列数十辈，皆假面异服，如祠庙中神鬼塑像。”

读了这段描述，不竟使人想起今日烟火晚会的情景：闪光和响声过后，空中飞出一连串降落伞一类玩物。而近九百年前的烟火爆仗，却放出那种画有钟馗或鬼神像的彩画。

烟火，是指起花或流星一类东西，想来你有可能见过，甚至在过年过节时还要买几个来玩玩。其中起花是由几层纸经过某种工艺要求而包裹碳粉较多的火药的玩物。一旦点着引线，纸壳里的火药就要燃烧。不过因火药中碳粉较多，它并不爆炸，而是生成大量的气体。这些气体从纸壳的下端快速喷出去，在几秒钟内，使纸壳升向天空。可以想象，由于起花的发明，离由火药喷射的火箭的发明已为期不远了。

目前更有权权威性的是潘吉星在《论火箭的起源》一文中提出的，认为我国火箭最早出现于宋高宗绍兴三十一年（公元 1161 年）采石场战役中使用的“霹雳炮。”

据《海鳅赋后序》载，当时宋将以快艇“海鳅船”冲至金舟，又以“霹雳炮”轰击金兵：

“我舟伏于七宝山后，……舟中忽发一霹雳炮。盖以纸为之，而实以石灰，硫磺。炮自空而下，落水中。硫磺得水而火作，自水跳出，其声如雷。纸裂而石灰散为烟雾，眯其人马之目，人物不相见。”

潘吉星认为，从这段文字可以推知，霹雳炮“与 12 世纪初期盛行的烟火中的‘起花’相似，即民间所说的‘二踢脚’。霹雳炮就是大型的‘二踢脚’。这是将烟火娱乐品转用作军事武器的一个实例。”

另据萨顿的《飞行科学》一书中讲到，在公元 1233 年，蒙古兵进攻时，曾利用过火箭，转而传入欧洲，以后阿拉伯人的著作中称它为“中国箭”。

齐姆在其著作《火筒明与喷射》中也提到，有一手抄本，叙述宋理宗绍定五年(公元1232年)汴京之战，并说明守城的人如何使用火箭把敌人吓退，根据他的分析和记载，推动火箭前进的力不是用弓的弹力，而是火箭燃烧进向后喷射的反作用力。至于在欧洲人的著作中，约在13世纪末，才看到火箭的字样。

后来，明代茅元仪所著的《武备志》一书中，有一种称为“火龙出水”火箭的记载：“水战，可离水三四尺燃火，即飞水面二三里去远，如火龙出于江面，筒药将完，腹内火箭飞出，人船俱焚。”

这说明在使用时，使火箭在离水面三四尺的地方燃火，燃火所形成的喷气推进火箭可达二三里远的地方，好像火龙飞出水面一样。当筒内火药将要烧完时，筒腹内的“火箭”飞出来，使敌方的人和船一齐燃烧起来。从这个记载来看，其原理已和现代的二级火箭基本相同。

前面提到，起花做得大，就可作为军事武器，那么如果把起花做得再大些，甚至不是一个而是好几个，靠它的力量带着人飞上天去也就不是什么妄想。

根据这一推想和企图，齐姆在他的著作中还提出：“约当14世纪之末，有一位中国官吏万户，他在一个坐椅的背后，背上四十七个当时他可能买到的最大的火箭，他把自己捆在椅子的前边。两只手各拿着一个大风筝，然后叫他的仆人用火同时把这四十七个火箭点着。他的目的是想借着火箭推进的力量加上风筝上升的力量飞向前方。”从历史记载着，这个试验没有取得成功。结果是一声爆炸，碎片纷飞，再也找不到万户。

另外，出现万户没有升到天上的结局，对于我们今天的人来说，并不难解释。

第一情况，物体受到两个力的作用，如果重力 G 和作用力 F 大小相等，又因它们方向相反而且作用在一条直线上，它们的合力就等于零。这时，物体处于平衡状态。

第二条情况，物体上的两个力虽然方向相反作用在一条直线上，但 $F > G$ ，物体不会静止下去，而是要上升。

第三条情况，不管 F 和 G 大小是否相等，虽然它们方向相反，但因为它们不在一条直线上，无法平衡，在 F 和 G 的作用下，物体会产生转动。

人坐在椅子上，火箭点燃后，作用在椅子上的力有近百个，即人的重力、椅子重量、两个风筝重量和47个火箭的重量，这些力的合力 $G_{\text{合}}$ 是向下的；另外，47个火箭向上的升力、风筝牵动时空气给风筝的推力都是向上的，这些力的合力 $F_{\text{合}}$ 也是向上的。

$G_{\text{合}}$ 和 $F_{\text{合}}$ 方向相反， $F_{\text{合}}$ 可能要比 $G_{\text{合}}$ 大许多，但要让 $F_{\text{合}}$ 和 $G_{\text{合}}$ 刚好在一条直线上，是很难办到的。更何况当时的人不懂得力学，不会设法让 $F_{\text{合}}$ 和 $G_{\text{合}}$ 尽可能地在一條直线上。

因此，火箭点燃后，尽管情况正常，但椅子的受力情况就如上例那样。这样，不但不会上升，而是要转动，坐在椅子上的人便摔倒于地，随着一声爆炸，也就呜呼哀哉了。

试验尽管失败了，但万户幻想空间飞行、企图上天的这种想象力是十分丰富的，其决心和勇敢精神也是令人惊叹的。所以，齐姆给予高度评价，称他是“第一个企图使用火箭作运输工具的人”，又称他是“第一次企图利用

火箭作飞行的人。”

我们认为，这不仅是中国力学史上的一件大事，而且也是世界科学技术史上的一个非常了不起的事件。为了纪念这位为人类航天而献身的最早的先驱者，现代科学家已将月球背面的一个环形山命名为“万户火山口。”

我们的祖先很早就有了飞到天空去的理想，给我们留下了如像万户进行空间飞行等美丽动人的幻想。而真正实现这些幻想的是我国 20 世纪 70 年代的科技工作者。1970 年 4 月 14 日，我国成功地发射了第一颗人造地球卫星，从而在 960 万平方公里的神州大地上，第一次把万户的幻想变成活生生的现实。

现代火箭

牛顿作用反作用定律是和影响人类生活的高新技术，特别是和航天技术紧密联系在一起。这不仅在我国，而且在世界各国都是如此。1957 年 10 月 4 日，前苏联成功地发射了第一颗人造地球卫星，震惊了全世界，开创了人类宇宙航行的新时代，就是最有力的证明。

宇宙航行要以现代火箭为基础，前苏联在航天技术方面的一度领先，不能不归功于俄国一位中学教师的影响，他就是齐奥尔科夫斯基。

齐奥尔科夫斯基自幼家境贫困，9 岁时因患猩红热引起耳聋而被迫中途退学。面对这样的逆境，他努力克服生理上的困难，顽强自学。功夫不负有心人，22 岁时他参加中学数学教师的招考，考试一举合格。从此，齐奥尔科夫斯基开始中学教师的生涯。但在业余时间，他依然一如既往地坚持搞科学研究。恐怕是受了著名幻想小说家儒勒·凡尔纳的影响，这位年轻、勤奋、与众不同的中学教师竟然也步儒勒·凡尔纳的后尘，写了一个题为《奇异的地球和天空》的科幻小说。就在这本书里，齐奥尔科夫斯基以令人惊叹的想象力，对于如何战胜地球的引力而飞出地球去的问题，作了十分生动而具体的分析。

紧接着，他于 1898 年写成《用火箭推进飞行器探索宇宙》一文，可是被拖延 5 年后才发表在俄国《科学评论》杂志上。这篇论文在人类历史上第一次把征服宇宙空间的问题，提到科学的基础上。然而他仍深情地把这归纳为：“著名幻想小说家儒勒·凡尔纳在我的脑子里播下了第一颗飞向宇宙空间去的思想种子。后来，我就在这种思想的引导下去进行工作了。”

根据牛顿力学定律，对于使用什么工具才能实现宇宙飞行，齐奥尔科夫斯基通过周密计算，得出的结论是：不能用气球和大炮，而只能用火箭，因为它可以在没有空气的大气层以外飞行。在此基础上，他又提出两个涉及火箭运动的颇为著名的问题并得出了解释。

齐奥尔科夫斯基的第一个问题，即火箭不受外力作用以一定的相对速度 v_r 将气体向后喷出而作加速直线运动的问题。设带有燃料的火箭的初始质量为 M_1 ，全部燃料用毕时的质量为 M_2 ，则齐奥尔科夫斯基第一问题的运动方程为

$$M \frac{dv}{dt} = -v_r \frac{dM}{dt}$$

由此可以解出当燃料用毕时火箭的速度 v_2 是

$$v_2 = v_1 + v_r \ln M_1 - v_r \ln M_2$$

其中 v_1 是火箭的初速度。

若 $v_1 = 0$

则燃料用毕时火箭的速度 v_2 为

$$v_2 = v_r \ln \frac{M_1}{M_2}$$

其中 M_1/M_2 称为火箭的质量比。可见，火箭所达到的速度 v_2 与燃料的燃烧时间无关而只与火箭喷气速度 v_r 和火箭的质量比有关。

齐奥尔科夫斯基的第二个问题，即火箭在重力作用下以一定的速度 v_r 将气体向下喷出而作垂直向上运动的问题。设带有燃料的火箭初始质量为 M_1 ，全部燃料用毕时的火箭质量为 M_2 ，则齐奥尔科夫斯基第二问题的运动方程为

$$M \frac{dv}{dt} = -v_r \frac{dM}{dt} - Mg$$

由此可解出当燃料用毕时火箭的速度 v_2 是

$$v_2 = v_r \ln \frac{M_1}{M_2} - gt_2 + v_1$$

其中 v_1 是火箭的初速度， t_2 是燃料用毕的时刻，即喷射气体所需的时间。

若 $v_1 = 0$

则燃料用毕时的速度 v_2 为

$$v_2 = v_r \ln \frac{M_1}{M_2} - gt_2$$

可见，与齐奥尔科夫斯基第一问题相比，火箭所能达到的速度 v_2 由于重力作用而减小 gt_2 ，一般称它为速度损失。速度损失与喷气时间 t_2 成正比，喷射时间越短，速度损失越小。

从上述两个问题的解中可知，当火箭喷气速度固定时，为了提高火箭的末速度，就应尽量提高火箭的质量比。为此，齐奥尔科夫斯基又提出两项重大的富有历史意义的建议。

一是建造多级火箭。齐奥尔科夫斯基通过计算后认为，由于当时火箭的速度难于超过 4 公里/秒，因此应用单级火箭是很难飞出地球去的，于是他建议使用多级火箭。

1929 年，在他著的《宇宙火箭列车》一书中指出，建造多级火箭可采用两种方法：火箭列车法。就是几个火箭像列车那样一个接一个地连接起来。发射时首先开动最末一个，等它的燃料完后，就从列车上脱落，于是倒数第二个火箭就接着开动……。这样，就可使最前的一个火箭达到可以飞出地球去的速度。火箭中队法，就是几个火箭像中队那样并排安排着。发射时一齐开动，燃料烧去一半后，两边的两个火箭就把剩余的一部分燃料合并到相邻的中间火箭去，最外边的两个火箭就从中队中脱离。这样，中间的火箭也可以达到飞出地球去的速度。

二是建造液体火箭。齐奥尔科夫斯基认识到，火箭喷气速度取决于燃气的温度和气体分子的质量，因此用煤和火药作用火箭发动机的燃料显然是不行的。于是他建议使用液体燃料，特别提出使用液氧作为氧化剂，液氢作为

燃烧剂。

他设计的火箭是这样的：“飞行器的外部形状像没有翅膀的飞鸟。里面大部分容器盛着液态氢和氧。这两种液体用隔板隔开，它们不能一下子就化合完，而是被人操纵着化合的快慢。火箭内还装了各种仪器以及坐了观测和操纵火箭的人。氧和氢在火箭发动机的细小部分混合以后，就发生化合作用生成水蒸汽，并产生很高的温度，水蒸汽的压力很大，从圆管的宽口里以惊人的速度向后喷出去，飞行器就向前进了。”

对于飞向遥远的星球，齐奥尔科夫斯基认为火箭所需的燃料没有必要一次就从地球上带够。因为在他看来，可以通过建造一个个地球卫星，在空中给火箭添加燃料。这个设想又是十分卓越的，他写道：“我们先要在大气层以外飞行，然后就建造地球的卫星——飞到别的星球去的驿站。随着一个个驿站的建立，在宇宙空间就出现了利用太阳能的工厂。这些工厂利用取之不尽的太阳能，供给我们光和燃料，使我们能在温室里栽培出奇异的果子，推动我们的飞船前进。”

齐奥尔科夫斯基提出的著名问题、建议和设想，尽管在沙皇俄国得不到赏识，尽管经常要遭到贵族们的非议，然而科学的真理一旦被揭示，总是要顽强地影响人类的社会生活。

是十月革命的胜利，给齐奥尔科夫斯基的研究工作带来勃勃生气。1929年，列宁亲自签署一项指令，决定给齐奥尔科夫斯基多方面的帮助。这时的齐奥尔科夫斯基虽已是60多岁的老人了，但为了祖国与人类的宇宙航行事业，他以更充沛的精力投入研究工作。有人曾统计，齐奥尔科夫斯基一生发表著作、论文、科普文章、科学幻想小说等近600项，其中450项是在十月革命后完成的，从而对火箭技术的发展产生了深远影响，因此齐奥尔科夫斯基被誉为“俄国的火箭之父”也是当之无愧的。

