

第 1 章 牛顿力学与机械观

1.1 物理学发展的几个阶段

物理学真正作为一门独立的自然科学,只有 400 年左右的历史,但是,在物理学创建之前,人类已积累了不少的物理知识,这为物理学的建立和发展打下了广泛的基础。

认识的发展既有继承性也有阶段性,物理学也不例外,我们可以将物理学的整个发展粗略地分为四大阶段。

1. 第 0 阶段(远古至 17 世纪初)

这一阶段是物理学的史前时期,故称为第 0 阶段。在这个阶段里,尽管经历了漫长的岁月,人类对大自然的了解还是很肤浅、很不全面的;所获得的物理知识也是定性多于定量,感性多于理性,零散而不系统。

例如关于电和磁的最早知识,约公元前 6 世纪古希腊已有所记述;我国战国时代成书的《管子》(约公元前 4 世纪)中也有关于天然磁体的记载;摩擦起电的发现则稍晚,大约到西汉末年(公元前 20 年前后)才有明文记载。

由乐器的演奏、制作而总结出的音律,同样也是最古老的物理知识。公元前 6 世纪,我国就有了三分损益法(见《管子·地员篇》),西方的毕达哥拉斯则确立了乐音与弦长或管长的关系。

在这一时期,人类对简单机械、几何光学也逐步积累了丰富的知识。其中特别值得一提的有:我国《墨经》(公元前 4 世纪)中的有关论述;阿基米德(Archimedes,公元前 287—前 212)的浮力原

理及静力学的一些基本规律。此后,还有 N. 哥白尼的日心体系学说,它取代了 C. 托勒密的地心体系说。

总的说来,我国在这期间所取得的成就并不逊于欧洲,某些方面还居于领先地位。例如,北宋沈括(1031—1095)在所著的《梦溪笔谈》(1086)中就论述了地磁及人工磁化,这比 W. 吉伯的《论磁性、磁体和巨大地磁体》约早 500 多年。令人遗憾的是,一些原来具有优势的项目逐渐落后于人。举一个最明显的例子,针孔成像、反射成像在《墨经》中早有记述,远在 2000 多年之前,我国就有人以透镜取火,但望远镜、显微镜的最早发明(17 世纪初)及有效使用都出现在西方,光的折射定律后来也是在欧洲发现的。

2. 第 1 阶段(17 世纪初至 17 世纪末)

这是物理学的初创时期。它起始于 G. 伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)时代持续到牛顿力学之前。在这不到 100 年的时间里,物理学逐渐形成为一门精密的学科。

这一阶段的特点是:大批的学者摆脱了亚里士多德经院式哲学的束缚及宗教的专横统治,不再满足于对自然现象的消极观察和对物理知识的简单归纳,而是走向更积极的实验研究及更细致的定量分析。于是,在物理学中开展了数学应用及实验工作,并且开始从感性认识向理性认识过渡。

这些科学风气的形成,主要是由于伽利略的创导。在他的周围,很快形成了以实验工作为主的伽利略学派。其中最著名的有 E. 托里拆利(Torricelli, 1608—1647),他研究过抛体运动及液体自容器小孔流出的速度,将伽利略的空气测温器改进为酒精温度计;发现了大气压力(1643)并制成水银气压计(1644),这有力地打击了“自然惧怕真空”的传统偏见。亚里士多德是不承认真空的客观存在的,相应地,他也不认为空气具有重量、大气应有压力。

在这一时期内,除了伽利略、J. 开普勒和 R. 笛卡儿的主导工作,物理学方面的重大成就还有:万有引力与距离平方成反比

(I. 牛顿, 1666; R. 胡克, 1680); 动量守恒 (C. 惠更斯, 1669); 离心力及向心加速度 (惠更斯, 1673); 光的微粒说 (牛顿, 1666); 光的波动说 (惠更斯, 1678); 气体体积与压强的反比关系 (R. 玻意耳, 1661; E. 马略特, 1676)。

此外, 物理学还初步具备了一些较精密的基本测量 (时间测量、温度测量、压力测量……) 仪器。以上这些成就为力学、光学、热学的建立及发展开辟了道路。

当欧洲致力于将物理知识定量化、理性化的时候, 我国却停滞不前了。1600—1687 年, 即明万历 28 年到清康熙 26 年, 不仅战乱连绵, 更由于长期封建统治、尊儒崇文、轻视工匠技艺, 加之小农经济的不求进取, 这就必然使得我国的科学技术落后于西方, 并且逐渐拉大了差距。尽管其间有几位外国传教士顺便将伽利略学派的力学、透镜光学带进了中国, 但几粒石子掷于一潭深沉的死水中, 毕竟掀不起大浪。

3. 第 2 阶段 (17 世纪末至 19 世纪末)

这是物理学的成熟时期。在此期间, 物理学成长为一门完整的自然科学, 它既是精密的实验科学, 又是严谨的理论科学。这一阶段的特点, 在于物理学的逻辑化、系统化及统一化。

它以牛顿建成本力学体系为起点, 其标志为《自然哲学的数学原理》一书的出版 (1687)。半个世纪以后, 相继发展出流体力学 (1738)、刚体力学 (1752—1760)、天体力学 (1790—1825)、弹性力学 (1821—1828), 后来又建立了完整的声学理论 (1877)。另一方面, 为了力学在广泛应用中的求解方便, 不断更新了基本定律的表达形式, 由此产生了分析力学 (1743—1788), 为力学通往其他的物理领域提供了桥梁。总之, 在这 200 年里, 牛顿力学经过完善、壮大, 大有发展到登峰造极的气势。

在牛顿力学的带动下, 物理学其他分支的理论探讨也活跃了起来。在此期间, 热动说取代了热质说, 光波说战胜了光粒说。蒸

汽机的发明(1765)促进了热力学的产生,而以分子的机械运动解释热现象的思想,导致 J. C. 麦克斯韦、L. 玻耳兹曼提出经典统计理论(1859—1872)。电磁现象的研究由分散逐步趋于统一。电流磁效应(1820)和电磁感应现象(1831)的发现,不仅使人们对磁、电之间的关系有了崭新的认识,而且迅速转化为生产力。由此诞生了电力工业,使生产面貌为之一新。1860—1865 年,麦克斯韦创立了统一的电磁场理论,预言了电磁波的存在,还将光波从弹性波纳入电磁波,电磁波的应用使通信事业大为改观。

到 19 世纪末,有关宏观世界的理论已经完整地树立了起来,从早先以力为中心的物理学,最后发展成为力、能、场三足鼎立的物理学。显然,牛顿和麦克斯韦的业绩是巨大的,人们常称 20 世纪以前的物理学为牛顿-麦克斯韦物理学,又称为经典物理学。还应该指出的是,生活在这一历史时期的一些著名的数学家,如 L. 欧拉、J. L. 拉格朗日、P. S. M. 拉普拉斯、J. B. J. 傅里叶、C. F. 高斯、W. R. 哈密顿等人,他们对经典物理学的发展有着不可磨灭的贡献。

在我国这一时期自康熙 26 年至光绪 25 年,正值大清帝国由盛而衰。康熙晚年即执行闭关锁国政策,短命的戊戌变法则发生于光绪 24 年(1898);其间,国外先进的科学技术既未受到统治者的重视,当然更谈不上及时引进;在物理学方面,只是在 19 世纪 50 年代翻译过几本外版书,影响有限,这就更加拉大了与西方的差距。顺便说一下,从 1840 年起,洋枪洋炮的多次入侵我国,使国门再也封闭不住了。

4. 第 3 阶段(20 世纪初至今)

这是物理学的革新时期。在 20 世纪的前 30 年里,物理学就经受了激烈的动荡,经典观念受到严重的冲击,物理概念发生了深刻的变化;总之,物理理论多次兴起了根本性的变革。

A. 爱因斯坦的相对论对传统的时空观进行的革命,使时空、

物质、运动在物理上紧密地联系起来,将运动规律从低速扩展到高速,从弱相互作用扩展到强相互作用。特别是 20 世纪 60 年代以来,相对论天体物理学及宇宙学不仅成为物理学和天文学的一个研究热点,还是相对论、量子场论、粒子物理学等分支学科的结合点。

量子理论起源于能量子(M. 普朗克,1900)和光量子(爱因斯坦,1905)。1913 年,N. 玻尔将量子化条件成功地引入氢原子的核模型;1923 年,L. V. 德布罗意提出物质普遍具有波粒二象性。由此产生了量子统计、量子力学及量子场论。1967—1968 年,又建立了电磁相互作用与弱相互作用的统一场论。

于是,物理学从力、能、场三足鼎立的经典格局演变为以场为中心的现代物理学。同时,物理学也进入到既研究物质运动也研究物质结构的新阶段。

从 N. 玻尔的原子学说 M. 盖尔曼的夸克模型,只花费了 50 年的时光。其间,迅速建立了原子物理学、核物理学及粒子物理学。另一方面,固体理论及等离子体理论也得到飞快的发展。

物理学的新发展必然给科学技术、社会生产带来新面貌。确实,相对论和量子论为人类发现和利用新能源、新材料及新技术提供了理论基础。核能的巨大威力不仅用于军事武器,也大规模地在工业上得到和平利用,1988 年全世界发电总量的 $\frac{1}{6}$ 是由核电站供应的,其中以法国居首位,它的核电为法国总发电量的 70%。半导体的研究导致晶体管的发明及集成电路的出现,第一只单片集成电路制成于 1958 年;电路集成度的惊人发展使电子工业日新月异,这又促使计算机迅速地更新换代,为计算机在各个领域中的广泛应用奠定了物质基础。又如,自 1960 年第一台激光器在美国问世以来,不到 30 年,激光就得到多方面的使用,使测量、加工、通信、医疗、信息记录等技术都有了较大的进展。此外,非晶材料及高温超导的发现,也展现出广泛的应用前景。

1.2 中世纪宗教势力的专横与亚里士多德经院主义哲学体系的禁锢

在古代,自然科学并没有从哲学中分离,古希腊、古罗马时代自然科学家也就是哲学家。宇宙的本源是物理还是精神,这是宇宙观的基本问题。以苏格拉底和柏拉图为首的唯心主义学派认为,宇宙的创立出于有目的的安排,给人眼睛是为了看东西,给人耳朵是为了听声音。如果不给我们鼻子,那么香味有什么用处?如果不是用舌头来品尝甜、酸和可口的滋味,那么人们对这些滋味会有什么知觉呢?而这些安排都是神的作用。柏拉图是苏格拉底的弟子,他认为真实的知识源泉是灵魂对理念世界的回忆,这是绝对荒谬的理念神秘主义。

公元前9世纪,古希腊诗人荷马的著名诗篇《伊利亚特》和《奥德赛》中就记载着丰富的传说与神话。公元前8世纪,希腊诗人肖特的《神谱》一诗记载了关于宇宙创生的传说:第一个出现的是一张张开的大嘴,接着是宽博胸膛的大地,而后是爱神爱罗丝;大嘴生出阴间和黑夜,黑夜怀孕,产生明亮的天空和白昼;大地诞生出有星星的天空,天穹笼罩大地使之永恒不动摇;大地还生出高山和大海,山上居住着喜爱山林的半神半人的女神们……从公元前6世纪到公元1世纪,宇宙学曾有过不少学派论争,中世纪后则陷入神学深渊,地心说主宰一切。

罗马帝国(公元前753年)成立后,基督教成为国教。由于政教合一,亚里士多德的宇宙观很自然地与之融合而产生了经院主义的哲学体系,亚里士多德的宇宙观认为天上分为许多等级构造,各有尊卑优劣;地上也有以法老、主教、皇帝等尊贵的至高无上的权威,他们统治了天上人间(图1-1)。当然,意识形态也就以此为标准了。经院哲学和神学占据了统治地位,人们稍有不逊,或有对

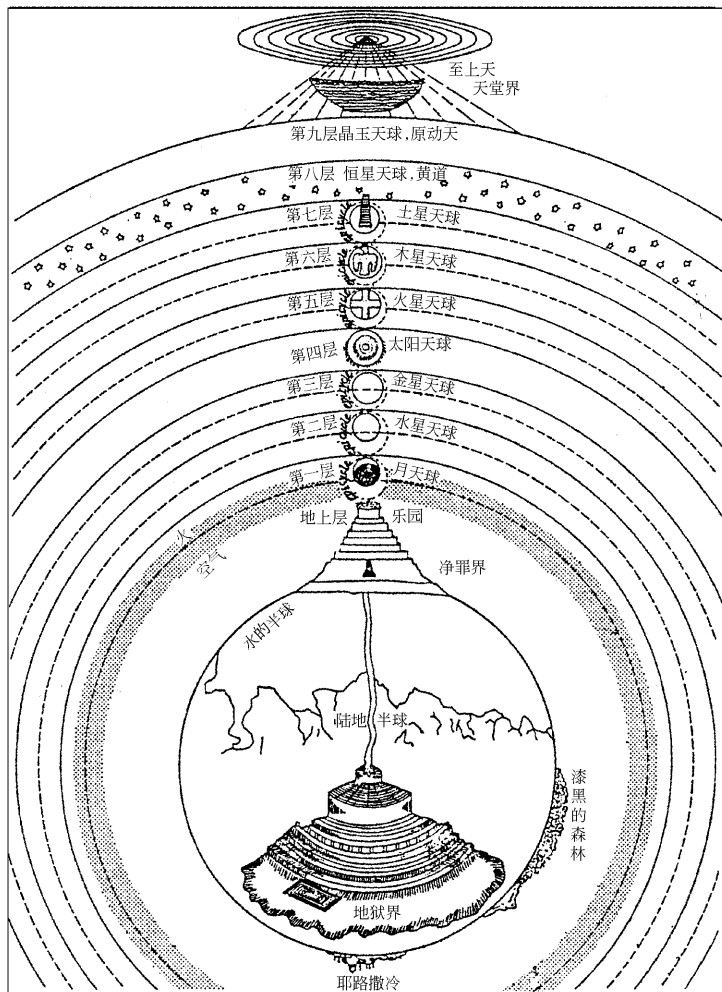


图 1-1 中世纪的位阶构造图

抗宗教的言行都被视为大逆不道、异端邪说，有的要被送往宗教法庭受审，布鲁诺就是典型的一例，这将在后面再详述。

远在古代希腊时代，亚里士多德就提出二界说，即以月亮为界，月亮以上为神界，凡神界天体均做圆运动而不下坠；月亮以下为世俗界，凡世俗界物体均做下落运动。直到牛顿指出，月球不下坠是因为它有较大的横向速度的原因，但牛顿不能回答月球的横向速度从哪里来，他把它归于第一推动，即上帝给的。康德提出星云演化论和万有斥力来解释横向速度的来历，拉普拉斯指出了康德的错误，提出横向运动来自角动量守恒。

实际上，人类认识宇宙自然有两大领域，一是科学，二是神学。凡是科学不能或暂不能证实的领域就被神学占领。例如，标准宇宙学涉及到宇宙的初始条件，即宇宙第一推动，谁是万能的主宰给出了宇宙的初始条件？自古以来，科学无法回答这个第一推动的问题（当然中国古代的道家学者庄周应该例外）。于是，神学家们对此大做文章，鼓吹上帝的存在。他们在《圣经》中说：“某些人对上帝创造天地之前说三道四，上帝为那些胆敢追究如此高深命题的人准备好了地狱。”

意大利著名的天文学家布鲁诺就是被神学宗教迫害致死的科学家。1548年，布鲁诺生于意大利那不勒斯诺那城一个没落小贵族家庭，由于家境贫困，他未能上大学。15岁时，他在一所修道院做工。在那里他阅读了大量的书。1572年，他成为一名牧师，并获得哲学博士学位。这时他对自然科学产生了兴趣，从而对宗教神学产生怀疑。由于批判《圣经》，他受到宗教法庭通缉，流亡异乡，曾在法、英、德、捷克等国讲学，反对宗教哲学及托勒密的地心说，宣传哥白尼的日心说。他的日心说引起了罗马宗教裁判所的恐惧和仇恨。1592年，罗马教徒采用欺骗手段把他骗回意大利，并立即逮捕。刽子手使尽了种种威胁利诱手段，但布鲁诺坚贞不屈，遭受了8年的折磨，最后被宗教法庭处以火刑。1600年2月17

日，布鲁诺被烧死在罗马的鲜花广场。布鲁诺大无畏地捍卫了真理，藐视反动的宗教法庭，在生命的最后时刻，庄严地向刽子手宣布：“你们对我宣读判词，比我听到判词还要畏惧！”在布鲁诺遇害289年之后，人们在他殉难的鲜花广场上，树立起他的铜像，永志纪念。

布鲁诺以生命捍卫并发展了哥白尼的日心说，他认为宇宙是无限的，在太阳以外还有类似的天体系统；太阳只是其中一个天体系统的中心，而不是整个宇宙的中心；太阳不是不动的，它对于其他恒星的位置也是变动的。

宗教神学对科学家的迫害一直延续到17世纪。哥白尼的不朽著作《天体运行论》直到他临逝前才出版。滑稽的是一位署名“无名氏”的奥西杰神父为这部书写了个序，序言中说：“此书所提出的不是一桩科学事实，而只是一套闹着玩儿的幻想。”但不知此序言是妄图贬低巨著的伟大意义，还是为了愚弄出版当局的检查。1632年，另一位天才的意大利天文学家、哲学家、数学家和物理学家伽利略出版了他的《关于托勒密和哥白尼的两大世界体系的对话》。这本书才出版了几个月，伽利略就被召到罗马受审，主教团判决：①这本书是禁书；②三年里，他必须每周背诵七篇忏悔书；③他被无限期监禁在家中。当时伽利略已年逾70，当他被迫在判决书上签字时，心里默念着：“可是，地球还在转动着啊……”伽利略在监禁中完成了另一部书《关于两种新科学的对话》，1637年此书在荷兰秘密出版。爱因斯坦评论说：“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。”1979年11月10日，罗马教皇在公共集会上承认伽利略在17世纪30年代受到的审判是不公正的。1980年10月，教皇又在梵蒂冈举行的世界主教会议上提出重新审理这个冤案。伽利略的沉冤昭雪说明了真理是不可抗拒的。

尽管亚里士多德被奉为圣贤，他的学说在中世纪还是不断有

人批驳，逐渐被新的见解所代替。

6世纪希腊有一位学者对亚里士多德的运动学说持批判态度，他叫菲洛彭诺斯(J. Philoponus)。他认为抛体本身具有某种动力，推动物体前进，直到耗尽才趋于停止，这种看法后来发展为“冲力理论”，其代表人物是英国牛津大学的威廉(William of Ockham, 1300—1350)。他认为，运动并不需要外来推力，一旦运动起来就要永远运动下去。他写道：“运动并不能完全与永恒的物质区分开，因为当可以用较少的实体时，就无需用更多的实体……没有这一额外的东西，就可以对各种运动给予澄清。”例如，关于抛射体运动，他解释为：“当运动物体离开投掷者后，是物体靠自己运动，而不是被任何在它里面或与之有关的动力所推动，因为无法区分运动者和被推动者。”他举磁针吸铁为例，说明要使铁运动并不一定直接接触，并且还进一步设想，这种情况在真空中也能实现，可见亚里士多德认为真空不存在的说法是可疑的。

当然，威廉的说法并不等于惯性原理，但这却是走向惯性原理的重要步骤。因为，如果运动不需要原因，一旦发生就要永远持续，亚里士多德的推动说就要从根本上受到动摇。

巴黎大学校长布里丹(F. Buridan, 1300—1358)也是批判亚里士多德运动学说的先行者。他反对空气是抛射体运动的推动者，亚里士多德对抛射体的解释是：在抛射体的后面形成了虚空区域，由于自然界惧怕虚空，于是就有空气立即填补了这一虚空区域，因而形成了推力。布里丹反问道：“空气又是受什么东西的推动呢？显然还有别的物体在起作用，这样一连串的推动根源何在呢？”他又举出磨盘和陀螺的例子，它们推动时无前后之分。两支标枪：一支两头尖，另一支一头尖一头钝，然而投掷时并不见得前者慢后者快。水手在船上，只感觉到迎面吹来的风，而感觉不到背后推动的风。这些都说明：“空气持续推动抛射体”的说法不符合事实。于是他提出“冲力理论”，认为：“推动者在推动一物体运动时，便对它

施加某种冲力或某种动力。”

布里丹的工作被两个人继承而继续进行，一位是 Saxony 的阿尔伯特 (Albert, 1316—1390)；另一位是奥里斯姆 (Nicholas Oresme, 1320—1382)，他是布里丹的学生。他们发现了冲力理论，阿尔伯特运用冲力来说明落体的加速运动，认为速度越大，冲力也越大，他写道：

“根据这个(理论)可以这样说，如果把地球钻通，一重物落入洞里，直趋地心，当落体的重心正处于地心时，物体将继续向前运动(越过地心)，因为冲力并未耗尽。而当冲力耗尽后，物体将回落。于是将围绕地心振荡，直到冲力不再存在，才重又静止下来。”

阿尔伯特这个例子在后来伽利略的著作中也有讨论，可见布里丹、阿尔伯特、奥里斯姆等人的早期工作为伽利略和牛顿开辟了道路。不论是伽利略还是牛顿，都在自己的著作中留下了冲力理论的烙印。

1.3 物理学初始发展时期的几种思辨方法

16 世纪以后，由于航海、战争、工业生产的需要，力学的研究得到了真正的发展，但是，要批驳亚里士多德关于落体运动等的错误理论，要真正从经院主义哲学体系中挣脱出来，从亚里士多德精神枷锁下解脱出来是非常困难的。这是一场思想革命。这里，我们就不得不花一些笔墨来介绍物理学初始时期值得提出的几个问题。

1. 悖论的思辨方法

首先，我们介绍关于运动的悖论 (paradox)，这就是芝诺悖论。

芝诺 (Zenon Eleates, 约公元前 490 年—约公元前 436 年) 出生于意大利南部的埃利亚城，是古希腊埃利亚学派的主要代表人物之一。他是古希腊著名哲学家巴门尼德 (Parmenides) 的学生。

芝诺极端信奉巴门尼德关于世界上真实的东西只能是“唯一不动的存在”这个信条，否定现实世界的运动，认为运动或变动是不可能的，并断言承认运动就会导致矛盾。芝诺以诡辩的方式阐述他这一学派的观点，其中芝诺的关于运动的四个悖论最为闻名。这四个关于运动的悖论引起了学术界极大的骚动，其余波至今尚未完全平息。下面介绍芝诺关于运动的四个悖论。

二分法 “运动不存在。理由是：位移事物在达到目的地之前必须先抵达一半处。”意思是：要通过 AB ，必先要从 A 出发到达 AB 一半的 C ；要到达 C ，必先要到达 AC 一半的 D ；要到达 D ，必先要到达 AD 一半的 E 。如此进行下去，永无止境，所以得出结论：运动不可能(图 1-2)。

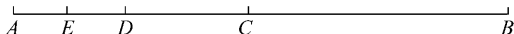


图 1-2 二分法示意图

阿克琉斯论证 “一个跑得最快的人永远追不上一个跑得最慢的人。因为追赶的人必须首先跑到被追的人跑的出发点，因此跑得慢的人始终永远领先。”意思是：甲的速度虽远大于乙，但乙先行于甲。甲要超乙，必先要赶上乙先达到的 B 点，当甲达到 B 点时，乙已进到 C 点，当甲达到 C 点时，乙又进入了 D 点。如此下去，结论是甲永远赶不上乙(图 1-3)。

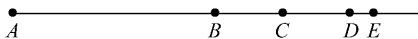


图 1-3 阿克琉斯论证图

飞矢不动 “飞着的箭静止着。”飞箭在任一瞬间必静止在一确定的位置上。所以，运动就是许多静止的总和。

运动场问题 “跑道上有两排物体，大小相同，数目相同，一排从终点排到中间点，另一排从中间点排到起点，它们以相同的速度做相反的运动，芝诺认为这里可以说明，一半时间和整个时间相

等。”原来的排列如图 1-4(a)所示；做相反方向的运动后，排列如图 1-4(b)所示。第一个 B 到达最末一个 L 的同时第一个 L 也到达了最末一个 B 处。这时第一个 L 已经经过了所有的 B，而第一个 B 只经过了 A 的一半。因此，一半时间和全部时间相等(这里引述的是亚里士多德《物理学》中介绍的)。

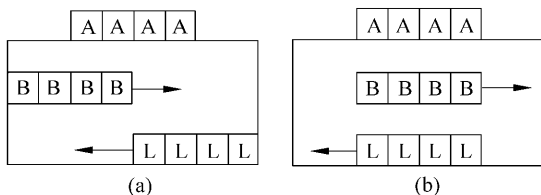


图 1-4 运动场问题

芝诺是揭示静止与运动、时间与空间的相互矛盾的第一批人之一。芝诺发现并注意到了运动的矛盾性，这个事实给以后的逻辑学、数学和哲学的发展带来了极大的影响。

在新旧学说激烈冲突并最终导致新学说代替旧学说的“科学革命”时期，从旧理论中引申出来的重要的“科学佯谬”，往往成为旧学说的送葬曲和新学说的催生婆。伽利略为了驳斥亚里士多德的运动理论而十分机智地从亚里士多德的理论结论中导出的“落体佯谬”，不仅对亚里士多德的理论进行了有力的“证伪”和否定，而且提出了“物体的下落运动到底是如何进行的”这个重要问题。对这个问题的实验和理论的探讨，使伽利略得到了著名的自由落体定律，进而接触到了力与运动的真实关系，最终把力学研究引上了正确的方向，导致了近代物理学中第一个完整的理论体系——牛顿力学理论的创立，成为近代物理学的真正开端。

在力学上，亚里士多德主要着眼于对“运动的原因”的探讨。他从神学目的论出发，将原因分为四种，即质料、形式、动力和目的，但是“后三者常常可以合而为一，因为形式和目的是同一的，而

运动变化的根源又和这两者是同种的。……”因而实际上亚里士多德是将世界划分成两个方面，即质料和形式。他指出，要解答运动“为什么”发生，就必须根究到“质料”和“形式”。亚里士多德认为，物质性的“质料”只是“潜在的”一种“可能性”，是僵死的和被动的；非物质性的“形式”不仅可以独立于质料而存在，是“现实的”，而且是主动的，具有活动性的，它联系于目的和运动变化的根源，是推动者，形式高于质料。任何运动着的事物，必然都有推动者在推动着它运动，但推动者也被推动着，如此追索下去，必然存在一个不带任何物质形式、不需要任何质料的最高的推动者，即“第一推动者”，“它是永恒的，先于其他而自身不动的推动者，可以作所有其他事物运动的根源。第一推动者必然是一个并且是永恒的。”亚里士多德根据这个观点考察机械运动，形成了他的运动理论。

亚里士多德认为，组成地面上物体的四种元素的本质差别，主要不在于它们的物质特性，而在于它们的自然运动的特性和在空间占据其特定位置的趋势。它们都有其本质上的轻或重，他写道：“我把那些在没有其他干扰的条件下总是向上运动的东西称做轻物体，总是向下运动的物体称做重物体。”各种元素都有回归到其静止的“天然位置”的趋势。土元素是绝对的重，它的天然位置在最低层；水元素是相对的重，它处在土的上面；气元素是相对的轻，它处在水的上面；火则是绝对的轻，它处在最高层。亚里士多德由此形成了他的“自然归宿”说：在不受外力的情况下，各种物体都会由于组成它的元素的本性而做回归到它的天然位置的运动，这种运动称为“自然运动”。重的物体竖直下落和轻的物体竖直上升的运动就是这种“自然运动”。地面上任何物体的实际运动，取决于组成它的最大数量的元素的倾向。含土元素最多的石头必然向宇宙的中心坠落，主要由火元素组成的烟焰必然会腾空升起；水受热而形成的水汽，由于吸收了大量的火元素而向上空升起；水汽在冷却中由于释放出火元素而恢复了水的优势特性，转而凝结降落到

下面的位置。

根据这种“自然归宿”说，必然会得出这样的推论：某一物体返回其“天然位置”的速率，完全取决于组成物体的各元素所占的比例，同占优势地位的元素的数目成正比。比如，大的石块由于比小的石块含有更多的土元素，所以当这两块石头自由下落时，大石块比小石块快得多，或者说经过相等的空间，重的东西比轻的东西落的时间要短一些。在《论天》这部著作中，亚里士多德明确写道：

“一定的重量在一定的时间内运动一定的距离；一较重的重量在较短的时间内走过同样的距离，即时间同重量成反比。比如，如果一物体的重量为另一物体重量的二倍，则它走过一给定距离只需一半的时间。”

在伽利略之前，亚里士多德的运动理论，特别是他的落体定律，已经受到不少人的怀疑，他们通过对运动情况的一般观察而得出了基本正确的结论。这些人的工作使长期被压抑的理智终于从对古代权威的屈从转化成一股不可抗拒的力量，发起了对亚里士多德的物理学的冲击，促使人们逐渐改变了对运动的观点。其中特别应该指出的是，比利时著名的力学家斯蒂文（Simon Stevin，1548—1620）于1568年出版的《静力学原理》的附录中所记载的落体实验。他写道：

“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十倍，把它们从三十英尺的高度同时丢下来，落在-块木板或者什么可以发出清晰响声的东西上面，那么它们发出的声音听上去就像是一个声音一样。”

用直接实验证明亚里士多德的理论，这是十分有意义的，不过这个实验在很长时期内鲜为人知。后来流传很广的关于伽利略以“比萨斜塔实验”使经院哲学家们目瞪口呆的故事，很可能是张冠李戴地把斯蒂文的实验加于声名卓著的伽利略名下的误传了。人们只知伽利略而不知斯蒂文，这是可以理解的，因为正是伽利略的

工作才使物理学的研究发生了根本性的变化。

伽利略在《关于两种新科学的对话》中，以三人对话的形式，生动活泼地讨论了物体运动和新力学问题。这三个人是代表亚里士多德观点的辛普利邱，代表伽利略观点的萨尔维阿蒂和善于思考、不偏不倚的沙格列陀。关于自由落体的讨论，是构成这本巨著的最精彩的中心内容，但它并不是直接从实验入手，而是首先从一个理想实验提出的“佯谬”对亚里士多德的落体定律提出诘难，逐步展示出他的研究的丰富内容。让我们来欣赏一下这场机智风趣的对话：

萨：“我十分怀疑亚里士多德确实曾经用实验检验过下面这个论断：如果让两块石块（其中之一的重量 10 倍于另一块的重量）同时从高处，比如说 100 腕尺（1 腕尺 = 20 英寸）高处落下，那么这两块石头下落的速率便会不同，那较重的石块落到地上时，另一块石头只不过落下 10 腕尺。”

辛：“他的话似乎表明，他已经做过这个实验。”

沙：“辛普利邱，可是我进行过检验，我可以肯定地对你说，重量为 200 磅以上的一枚炮弹到达地面时，重量仅为半磅的与之同时下落的步枪子弹并不会落后一柞（1 柞 = 9 英寸），倘若二者都是从高度为 200 腕尺的地方落下来的话。”

萨：“我们取天然速率不同的两个物体，显而易见，如果把那两个物体连接在一起，速率较大的那个物体将会因受到速率较慢物体的影响其速率要减慢一些，而速率较小的物体因受到速率大的物体的影响其速率要加快一些，你同意我的这个想法吗？”

辛：“毫无疑问，你的这种看法是对的。”

萨：“但是，如果这是对的，并假定一块大石头以（比如说）8 的速率运动，而一块较小的石头以 4 的速率运动，那么把两者连在一起，这两块石头将以小于 8 的速率运动；两块连在一起的石头应当比先前以 8 的速率运动时要大。但按照先前的说法，较重物体

反而比较轻的物体运动得慢；而这个效应同你的设想相反。由此可以看出，我是如何从你认为较重物体比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了。”

辛：“我简直不知怎么说好了……这就是说，这简直超出了我的理解力。”

这就是著名的“落体佯谬”，地地道道的一个科学“悖论”，它一下子就揭示出了亚里士多德落体理论的破绽和逻辑混乱；它同时也表明了，运用理想实验的推理法，比起永远可以被人挑剔指责的大量真实的实验来，会更容易、更有说服力地推翻一个包含着错误的理论。

“落体佯谬”的提出，以极其尖锐的形式揭示了亚里士多德落体定律的谬误。那么，落体到底是做什么样的运动呢？伽利略卓越地运用了一套理性思维和实验检验相结合的方法对自由落体运动的具体形态作了正确的描述，并把它纳入到一个更为普遍的运动理论体系之中，为新力学的建立奠定了基础。

2. 理想实验——理性思维与实验检验相结合的方法

在伽利略的落体运动定律的形成过程中，斜面实验起过重要作用。他在书中对这个实验描述得十分具体，写道：

“取长约 12 库比（1 库比=45.7 厘米）、宽约半库比、厚约三指的木板，在边缘上刻一条一指多宽的槽，槽非常平直，经过打磨，在直槽上贴羊皮纸，尽可能使之平滑，然后让一个非常圆的、硬的光滑黄铜球沿槽滚下，我们将木板的一头抬高一、二库比，使之略倾斜，再让铜球滚下，用下述方法记录滚下所需时间。我们不止一次重复这一实验，使两次观测的时间相差不致超过脉搏的十分之一。在完成这一步骤并确证其可靠性之后，就让铜球滚下全程的 $\frac{1}{4}$ ，并测出下降时间，我们发现它刚好是滚下全程所需时间的一半。接着我们对其他距离进行实验，用滚下全程所用时间同滚下一半距离、三分之二距离、四分之三距离或任何部分距离所用时间进行

比较。这样的实验重复了整整一百次,我们发现,经过的空间距离恒与所用时间的平方成比例。这对于平面(也即铜球下滚的槽)的各种斜度都成立。我们也观测到,对于不同的斜度,下降时间的关系与作者预计并证明过的比例一样。”

“为了测量时间,我们把一只盛水的大容器置于高处,在容器底部焊上一根口径很细的管子,用小杯子收集每次下降时由细管流出的水,不管是全程还是全程的一部分,都可收集到。然后用极精密的天平称水的重量,这些水重之差和比值就给出时间之差和比值。精确度如此之高,以至于重复许多遍,结果都没有明显的差别。”

这个实验设计安排得非常巧妙,许多年来,人们都确信伽利略当年就是按他所述的方案做的。在历史博物馆中甚至还陈列着据说是伽利略当年用过的斜槽和铜球。

在这本书中,他再次表述了惯性定律,他用图 1-5 中小球的运动来说明他的见解。假设沿斜面 AB 落下的物体,以 B 点得到的速度沿另一斜面 BC 向上运动,则物体不受 BC 倾斜的影响仍将达到和 A 点同样的高度,只是需要的时间不同而已。

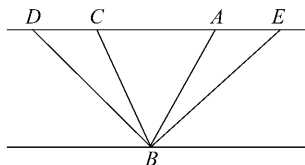


图 1-5 伽利略关于斜面运动的插图

若斜面坡度降低,则小球会不断延伸运动下去。

请再读他的作品中的另一段对话:

“萨:……如果没有引起球体减速的原因……你认为球体会继续运动到多远呢?”

辛:只要平面不上升也不下降,平面多长,球体就运动多远。

萨：只要这样一个平面是无限的，那么，在这个平面上的运动同样是无限的了，也就是说，是永恒的了。……”

这就为惯性定律的建立奠定了基础。

惯性定律是牛顿力学的重要基石之一，从亚里士多德的自然哲学转变成牛顿的经典力学，最深刻的变化就在于建立了惯性定律。前者认为“一切物体的运动都是由于其他物体的作用”；而后者认为“每一个物体都会继续保持其静止或沿一直线做等速运动的状态，除非有力加于其上，迫使它改变这种状态。”这就是牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中，作为第一条公理提出的基本原理。

1.4 牛顿力学的建立与机械观的形成

若要介绍牛顿力学的建立，这里先要介绍一段脍炙人口的名言。牛顿在一封给胡克的信中写道：“如果我看得更远，那是因为站在巨人的肩上。”在这里“巨人”指的是笛卡儿等人，当然不言而喻也包括了牛顿多次提到的伽利略、开普勒和哥白尼。其实牛顿完成的综合工作是基于中世纪以来世世代代从事科学研究的前人所积累的成果，牛顿和前人的关系如图 1-6 所示。下面我们介绍一下几位的重要贡献。

欧几里得(Euclid, 约公元前 300 年)，古希腊数学家。他的代表作《几何原本》从一些定义、公理出发，通过演绎方法，建立了严谨的逻辑体系。这本书早先以手抄本流传，他死后约 700 年才正式出版发行，到 19 世纪末已有一千多种版本，仅次于《圣经》。A. 爱因斯坦曾经作出这样的评价：“如果欧几里得未能激起你少年时代的热情，那么你就不是一个天生的科学思想家。”牛顿的《自然哲学的数学原理》既用到它的几何知识，也仿效了它的体系和风格。

G. 伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)，意大利科学家。他原本学医，却对欧几里得的几何学和阿基米德的力学极有兴趣，从

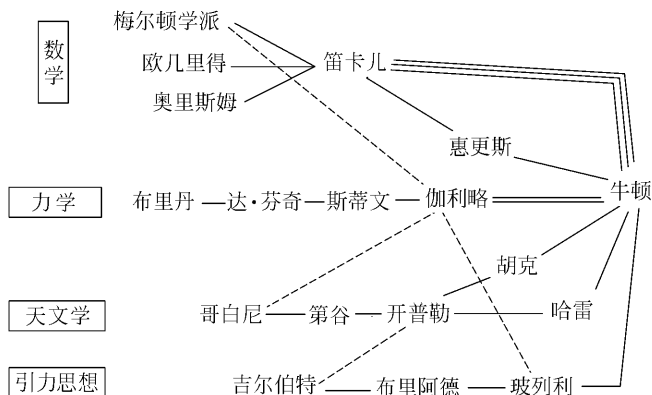


图 1-6 牛顿与前人的关系

而转向数学和物理学。有关他的工作,前面已作了不少叙述,这里再简要地说几点。他发现摆的周期性、运动的叠加性及惯性、重力加速度是恒定的等重要规律,并提出著名的力学相对性原理,常称为伽利略相对性原理。这些工作奠定了动力学的基础,使力学走向精密科学。不过,伽利略并没有进行传说中的比萨斜塔实验(重物与轻物同时下落);他所说的惯性运动,指的也不是匀速直线运动,而是圆周运动。由于伽利略积极宣传 N. 哥白尼的日心说,受教会迫害被判处终身监禁。直到 20 世纪 80 年代,梵蒂冈的教皇才为伽利略平反昭雪。

J. 开普勒(Kepler, 1571—1630), 德国天文学家。他信奉哥白尼学说, 利用 B. 第谷(Tycho Brahe, 1546—1601)积累的二十多年的天象资料及自己的观察结果, 发现了行星运动的三定律(1609—1619)。牛顿的万有引力公式正是在开普勒定律的基础上提出来的。有关他的工作下面还将再作介绍。

R. 笛卡儿(Descartes, 1569—1650), 法国学者。他的工作前面已经作过介绍, 这里再介绍一些有关天体研究方面的工作。他