

湖北省《物理学史》

讲习班资料(2)

经典物理的发展史

申先甲

(北京师院)

湖北省暨武汉市物理学会
武汉师范学院物理系

一九八四年四月于武汉

经典物理学的发展

第一章“和谐的宇宙”

一、哥白尼的世界体系

“自然科学借以宣布其独立并且好象是重演路德焚烧教谕的革命行为，便是哥白尼那本不朽著作的出版，他用这本书（虽然是胆怯地而且可说是只在临终时）来向自然事物方面的教会权威挑战。从此自然科学便开始从神学中解放出来”。（《自然辩证法》，8）

尼古拉·哥白尼(N. Koppernigk. 1473—1543)是波兰伟大的天文学家。青年时期曾在意大利求学，回国后担任牧师职务，但他始终关心的是新的世界体系问题。

当时公认的是希帕克—托勒密体系，大约在公元150年前后，亚历山大的托勒密(O. Ptolemaeus)在其《最伟大》一书中提出了一个精致的地心体系。他写道：

“天宇是球形的并且作球体运动；大地就形状来说，显然是球状的……；就位置来说，它恰在天宇的中央，象几何中心一样；就大小和距离来说，〔大地〕与恒星比较就是一个点，它本身完全没有运动。”

托勒密用动⚙的判据提出，如果地球在转动，其周围的大气将不会被带走，因而云将向西飞去，鸟和大气中的其他东西都会被带往西方。他正是根据当时的这种看法否定地动思想的。他创造了由偏心轮、本轮和等大轮三种几何图形和一组匀角速圆周运动的组合构成的模型，解释了当时观察到的天体运动现象，其中包括行星的逆行、太阳的运动速率随季

节的变动等现象。由这个模型所计算出来的天体运行的位置，其误差在 2° 范围以内，这是一个很大的成功。

托勒密体系能流行一千五百年来，有以下原因：① 它相当准确地预言了太阳、月亮、行星的位置；② 它符合古人“天然运动”和“天然位置”的见解；③ 它同人们的日常感觉经验相符合，令人安慰地认为我们生活在一个不动的地球上，它处于宇宙中心；④ 后来它又因为符合于教会的教义——“人类中心”、“地球中心”——而受到教会的支持。所以，虽然托勒密自己只满足于给出了一个计算天体位置的教学模型，但后人却相信这是关于天体运动的真实模型。

到了哥白尼时代，已经获得了相当大一部分准确的天文观测资料，托勒密体系的繁复冗杂也愈来愈受到人们的批评。哥白尼认为，古人为了建立一种地心说体系，而把地球自身的三种运动都加给了每个天体，因而使古希腊人的宇宙体系不必要的复杂化了。在1530年左右以手抄本流行的一本《短论》中，哥白尼批评了托勒密体系“看来既不是充分完整的，也不是令人充分满意的”。而在1543年出版的《天体运行论》中，他完整地提出了日心说体系。实际上他是提出了这样一些基本假定：

- ① 地球的中心不是宇宙的中心，而仅仅是引力和月球轨道的中心；
- ② 所有天体都绕太阳运转，所以太阳在宇宙中心位置；
- ③ 地球到太阳的距离远远小于地球到恒星的距离，所以看起来恒星是不动的；
- ④ 天体的视运动都是由于地球的自转；太阳的视运动也~~起于~~由于地球的运动。地球象其它行星一样绕太阳运转。因此地球有一种以上的运动；
- ⑤ 行星的表观逆行不是它本身的运动引起的，而是来自地球。所

以。仅仅用地球的运动就足以解释天空中多种表观运动。

接着，哥白尼描写了他的宇宙结构，下表表示了哥白尼体系的基本图景，即行星的顺序、轨道半径和运转周期：

行 星	轨道半径 (A U)		公 转 周 期	
	哥 白 尼 值	现 代 值	哥 白 尼 值	现 代 值
水 星	0.376	0.387	88 天	87.97天
金 星	0.719	0.723	224 天	224.70天
地 球	1.00	1.00		
火 星	1.519	1.523	687 天	686.98天
木 星	5.219	5.203	11.8 年	11.86年
土 星	9.21	9.538	29.9 年	29.46年

哥白尼体系比起托勒密体系具有以下明显的优点：

第一，哥白尼体系有着内在的简单性，托勒密体系用八十多个繁琐的圆来解释天体的表观运动，并让太阳和五个行星都作几种复杂的运动；哥白尼体系则用地球的公转和自转解释天体的多种视运动，从而将圆减少至三十四个。所以，哥白尼提供了用圆周和匀速运动解释天体现象的最简单的方案，从而也使天文学上的测算变得更加容易了。

第二，哥白尼体系具有一种内在的谐和性。这个体系把每个行星轨道的大小、运动的速率和排列顺序关联起来，形成一个紧密的整体；它还把中心位置给予了太阳这个最大、最亮的光、热和生命的赠送者。哥白尼写道：

“这样，我们就在这种秩序的安排的背后，发现了宇宙中令人惊异的对称性以及运动和轨道大小之间呈现出的清晰的谐和性。”

最后，哥白尼体系还提出了许多重要的物理学问题和富有启发性的思想。哥白尼清楚地理解到他的体系与托勒密体系之间的根本差别，在于描述所观察到的运动时选取的参考系不同。他写道：

“位置的每一表观运动，或由于被观察事物的运动，或由于观察者的运动，或由于两者作不同的运动。……所以，假若某种运动应当归之于地球，……那么在地球以外的宇宙部分，这种运动就会表现为方向相反的运动，好象外边的事物从旁边经过一样。周日的运转，……就是这样一种运动。”

这是关于运动的相对性的一个清楚的表述。在哥白尼体系中，由于把地球和行星视为等价的，因而也把引力看作是普遍的，即所有天体都具有引力。他说：“很可能日、月和行星也具有这种感应力，使他们能靠这种引力的作用保持球形。”哥白尼的工作的最重要的意义，在于它为理解行星的运动开辟了一条新的途径——动力学的途径。这个体系启发了刻卜勒等人按照全新的方式去考虑行星的真实轨道，进而又为引力理论的发展开辟了道路。

但是，哥白尼体系却遭到了来自科学和神学两个方面的反对。来自科学的第一个反对意见是，如果地球转动，空气、云和鸟等将会被抛向后方；另一个反对意见是，如果地球高速旋转，将会由于离心力的作用而土崩瓦解。来自神学的激烈反对是可以预料的。哥白尼体系摧毁了“人类中心”和“天界是神圣的”观念，而一致世界的物质统一性的结论，这都严重冒犯了神学教条。所以宗教的信徒们从圣经中找引证据，坚持说上帝是按照托勒密的蓝图创造世界的。新教领袖路德把哥白尼叫作“想推翻全部天文科学的傻子”。到了1616年，教皇柏拉明宣布哥白尼

学说是“荒谬的和完全违背圣经的”。在《天体运行论》被发行时，前加了一个“为本书的假设致读者”的前言，说这个学说不一定对，只是一种方便的数学方法和假设，并不能反映出真理来，因此人们不应该由于本书的假设而动摇自古以来的信仰。五十年后，刻卜勒才揭穿这个前言的作者是路德派牧师奥席安德，他乘哥白尼病危和负责出版本书之机，背着哥白尼写了这个前言，以消除这个学说的巨大影响。但是，这个学说毕竟以其崭新的图景引起了人类宇宙观的巨大变革，使人们对传统的观念发生怀疑，激励人们去进一步探索宇宙的奥秘。

二、新科学的伟大殉道者——布鲁诺

意大利哲学家布鲁诺（约1548—1600）是为新学说而斗争的第一批战士之一。他接受了文艺复兴思想的影响，提出了“怀疑原则”来反对教会权威和神学教条，认为只应该承认用经验认识到而又为理性的光芒照亮的科学真理。

布鲁诺热情宣传哥白尼学说，但又比这一学说走得更远。他抛弃了太阳是宇宙中心的观点，批评了亚里士多德关于宇宙有限和天外无物的观点；认为宇宙是物质的、统一的和无限的，在我们的太阳系外还有无数的世界。他还提出了太阳和一切恒星都绕轴运动的天才猜想。他写道：

“宇宙由无限的以大空间及在其中运动着的无数物体所组成，天空决非坚固的精制玻璃穹窿，星星就象钉子一样插入其中；实际上，全部以太区是一个不可分的液态连续区，处于其中的每个星体由于自身的活力而绕自己的中心和它的太阳自由地旋转着。这些绕各自的太阳旋转的世界，就象太阳系一样是适于居住的。在基元物质与天体物质之间没有任

何差别。不存在不动的中心。整个宇宙是统一的，由于自己内在的生命而生气蓬勃的组织。”

这些观点比哥白尼更为有力地摧毁了宗教关于宇宙有限、人类中心、地球中心的教义，所以遭到教会更残酷的迫害，他被开除教籍而流亡于瑞士、法国、英国、德国各地，1592年被阴谋骗回意大利遭宗教裁判所逮捕下狱。拷打和刑讯都不能使他放弃自己的信念，最后于1600年2月17日，被活活烧死于罗马鲜花广场。在听到判词时布鲁诺说：“你们对我宣读判词，比我听到判词还要恐惧！我愿为殉道而死。”恩格斯赞扬道：“同现代哲学从之开始的意大利伟大人物一起，自然科学把它的殉道者送上了火刑场和宗教裁判所的牢狱”。（《自然辩证法》，8）

三、刻卜勒的新宇宙

哥白尼的理论在提高天文测算的精确度上并没有多大的提高近代早期最重要的观测工作，是由丹麦天文学家第谷·布拉赫（T·Brahe，1546—1601）进行的，丹麦国王腓特烈二世把哥本哈根海峡的赫芬岛赠给第谷并拨款修建了一座天文台第谷对观测仪器进行了改进，增加了仪器的稳定性和长期反复观测读数的可靠性并对大气折射效应进行了修正，这使他的观测的准确性远远超过他之前的观测几十倍到上百倍。不过他依之进行天象观测的却是一个折衷的宇宙体系，在这个体系里，除地球外所有的行星都绕太阳运转，而太阳却率领着众行星围绕着地球转动，地球是静止不动的。腓特烈二世逝世后，第谷失去了资助者1599年，他到布拉格得到了奥皇鲁道尔夫的一份赠款于是他就把部分仪器移到了布拉格，在这里他得到了一个有为的青年助手刻卜勒，

共同进行观测，直到1601年逝世。

约翰·刻卜勒（J. Kepler 1571—1630）是德国文学家。他在哥廷根大学神学系学习时，受到天文学家麦特林的影响而熟悉了哥白尼的学说，他的终生愿望就是要完成日心说体系。第谷死前将所有的天文观测资料送给了刻卜勒，刻卜勒一方面在编制星行表（1627年出版了他的《卢道夫星行表》），一方面进行着他对行星轨道特点的研究。

刻卜勒是一个深受毕达哥拉斯和柏拉图影响的数学家，他坚信上帝是按照完美的数学原则来创造世界的，他以数学的和谐性探索宇宙体系。在1596年发表的《宇宙的秘密》中，他用古希腊人已发现的五个正多面体和当时已知的六颗行星的轨道的套迭，来解释为什么恰有六颗行星和为什么它们又有这些大小的轨道。他的这个安排虽然表现了他的想象力和数学才能，却全然是偶然的和带有数学神秘性质的。但他却因此引起了伽利略和第谷的注意。

对火星轨道的研究，是刻卜勒重新研究天体运动的起点。同哥白尼不同，他认为轨道是真实的，而真实的运动必有某种物理原因，即必是由某种力引起的。这使他所发现的运动规律自然导向动力学的发现。经过一年半之久的七十次试验，他企图用一个偏心轮和一个等大轮的各种组合来解释火星的运动，但在沿黄道的南和北的运动上和第谷的观测存在有8分角度的误差。他没有把它作为“观测的误差”忽略过去，而是敏锐地觉察到用旧的偏心轮和等大轮的组合永远不会符合于观测，因此，轨道不是一个圆周，并且没有这样一点，绕该点的运动是匀速的，这样，束缚人们头脑二十个世纪之久的柏拉图的用“匀速圆周运动”来解释天体运动的观念，第一次受到严肃的挑战。又经过好几个月的假定与计算，最后得出了著名的轨道定律：行星沿椭圆轨道运动，太阳在椭圆的一个焦点上。

刻卜勒深知，为了能够利用在地球上所观测的数据确定火星的轨道形状，首先必须准确地确定地球轨道的形状；另外，为了能够对火星的位置进行预测，需要发现火星沿轨道不同部分运动的快慢。这项研究，使刻卜勒发现这两个行星在近日点附近运动得快一些而在远日点附近运动得慢一些，但在相同的时间内太阳到行星的联线所扫过的面积都是相等的。这个关系是如此美妙和简单，所以刻卜勒虽然只计算了这两个行星在最近和最远处的面积速度，他却坚信这个关系对任何行星和对轨道的任何部分都是正确的。

1609年，刻卜勒在《新天文学》中发表了上述两个定律。但他认为，还需发现各个行星之间存在着什么关系，才可以结构一个太阳系的整体模型。他忍受着贫困、疾病和家庭生活中的不幸，终于在1619年得意地在《世界的和谐》中写道：

“我经过长期艰苦的工作以后，利用第谷的观察数据，发现了真正的关系……十七年来我对第谷的数据所进行的艰巨的劳动与我起初认为是梦想的目前研究结果之间的完全一致，顿时消除了我心中的巨大阴影……”

这个定律是，行星周期的平方正比于它们到太阳的平均距离的立方。

刻卜勒没有停留在观察和数学描述上，而是企图用力的作用解释天空中的运动，他不认为行星的轨道运动是不言而喻的。这是一个正确的目标，牛顿正是沿着这个正确思想创造出他的天体力学理论的。

四、伽利略的天文发现

伽利略·伽利莱（Galileo Galilei 1564—1642）的英勇斗争，在新宇宙的确立中起了决定性的作用。他在比萨大学读书

时就对亚里士多德的理论产生了怀疑，毕业后在比萨大学任教，由于他反对亚里士多德的结论和重视实验，而受到学校当局的反对被赶出学校。1592—1610年，他在威尼斯公国的帕多瓦大学执教并作了不少研究工作，逐渐形成了他的科学世界观。

1609年，在听到荷兰人发明了望远镜的消息后，他很快自制了这种仪器，最后使物象近了三十多倍。他用这个望远镜去观察天空，因为他要为证实哥白尼体系和推翻逍遥派的观点寻找事实证据。在1609年到1610年的几个星期内，伽利略就获得了几项第一流的重大发现，这些发现是：

① 月球的表面是凹凸不平的，不象亚里士多德所说的天体都是平滑无瑕的；

② 发现了过去看不见的无数恒星；银河也是由千千万万暗淡星星所组成；

③ 木星有四个卫星围绕它旋转。这表明不以地球为中心而运转的天体也是存在的。这一发现是对教会观念的有力打击，是对哥白尼学说的重要支持；

④ 太阳表面有黑子，它也不是完美无瑕的，后来的观察表明太阳黑子按一定规律在太阳表面运动，于是他断定太阳以27天左右的周期转动；

⑤ 金星象月亮一样有各种周相，表明它如哥白尼所说是绕太阳运转的。

伽利略由于这些轰动一时的发现而被人们称为“天上的哥伦布”。他的观察支持了哥白尼学说。他的这些发现载于1610年出版的《星界信使》里。

1632年，出版了伽利略《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的

对话》，它以三位学者对话的形式展开了他的阐述。《对话》分四天进行。

第一天的内容是批判逍遥学派关于地上的“基元实体”和天上的实体根本对立的学说，论证它们在本质上是类似的。这里引据了新星出现、彗星、太阳黑子、月亮上的山谷等反证，驳斥了“不变是高贵的和完善的标志”的传统观点，在论述中伽利略阐述了他关于物质守恒的思想。

第二天的对话分析了地球的昼夜运动问题，在驳斥反对哥白尼的人所提出的“落体佯谬”的物理论据时，伽利略表达了相关的力学原理：惯性定律、运动叠加定律和伽利略相对性原理。这一天是《对话》的中心部分。

第三天对地球的绕日周年运动作了分析，这里提出了一系列有利于哥白尼体系的观测论据，并对宇宙有限和具有中心的观点提出了怀疑（由于书报检查，他不能明确阐述宇宙无限的论点）。

第四天叙述了关于潮汐的理论。他以为地球的两种运动使地球产生颤动，使海水来回击荡而产生了潮汐，它表明了地球的运动。伽利略否认太阳和月亮引起潮汐的说法，因为是意味着天体比地球高一等并能够影响地球上的事件。当然，伽利略的这个理论是错误的。

1610年秋天，伽利略受聘到佛罗伦萨担任托斯卡尼公国宫廷首席科学哲学顾问。他的天文发现，被亚里士多德的信徒们说成是应用望远镜而产生的幻觉。1611年12月，一个从神学上反对哥白尼学说的浪潮掀起了。伽利略虽一再表示他对上帝的虔诚，说“圣经和自然，两者是一道并进的”，但教会判定哥白尼学说是荒谬的，伽利略的学说违背圣经教义，可能属于异端。最后发布了“1616年禁令”，不许伽利略“再以任何方式，不论以口头还是以文字，坚持讲授和辩解地球运动、太阳不动的论点”。伽利略没有停止他的研究和宣传工作，于1632年出版了前面所说的《对话》。此书的出版，在各国科学界引

起了巨大轰动，哥白尼的信徒们极力赞美，亚里士多德派的教士们则认为是对他们的挑战。他们呈请教皇发布了禁止此书发行的禁令，随即宗教裁判所又发出了传讯伽利略的命令。1633年，在宗教裁判所的刑讯和威胁下（不表示悔罪就要焚烧他全部研究工作的手稿，这可能是伽利略最关心的），伽利略被迫在悔罪书上签了字。此后他就终身监禁在家，失去了人身自由。伽利略在非常困难的情况下，秘密而专心地进行力学研究，并于1638年在荷兰出版了《关于两种新科学的对话》，基本上结束了他的研究工作。1642年1月8日，这位七十八岁高龄体弱失明的老人，孤独地去世了。

耐人寻味的是，1979年，罗马教廷由教皇保罗二世出面，声明为过去教廷迫害伽利略的罪行认错，宣布为伽利略平反。但是，教廷的迫害所造成的历史后果却是无法挽回的。

第二章 牛顿力学体系的建立和发展

第一节 牛顿力学体系产生的时代背景和历史渊源

一、时代的要求

从伽利略逝世(1642)到牛顿的《原理》出版(1687)这四十五年内。科学研究的社会组织发生了重大变化。先后在意大利、法国和英国出现了科学团体组织。科学期刊也很快出现。如英国的《皇家学会哲学杂志》(1665),法国的《学人杂志》(1665),德国的《学术论丛》(1682年)等。这样在十七世纪形成了国际科学联系形式,成为科学知识迅速进展的重要因素。

在各门自然科学的发展中,居于首位的是对当时航海、战争和工业生产有直接关系的、以天体和地球上物体的最简单的运动形式——机械运动为研究对象的古典力学。以钟表和磨机在欧洲的广泛传播为前提为机器的采用,为当时的科学家创立古典力学提供了实际的支点和刺激。匀速运动的理论,就是在研究钟表的基础上发展起来的,在研究磨机动作的基础上,逐渐创立了关于摩擦、动力测量和齿轮传动等方面的理论。采矿和其它生产部门的需要,引起了关于打击和碰撞问题的研究;火炮的运用,推动了关于抛射体运动的研究;特别是关于航海问题的研究。决定性地促进了把较早发展起来的力学、天文学和数学的研究成果集纳在牛顿所完成的科学综合里。

二、亚里士多德的运动理论

在第一编中已经讲过，中国古代已经有许多关于力学理论方面的研究成果。同样，西方古代关于力学问题也进行了许多研究，而且对近代物理学的发展直接产生了影响。特别是，对亚里士多德运动理论的检验和修正，成为近代力学研究的重要起点。

亚里士多德（Aristotle，前384—322），古希腊伟大的思想家。他在雅典创立了“逍遥学派”，对古代科学的各个方面都作了广泛的研究，他的著作被称为古希腊思想史的“百科全书”。

亚里士多德把世界分为质料（物质）和形式两个部分，认为形式可以独立于质料而存在；质料是僵死的和被动的，形式才是“现实的”、“具有活动性的”。是“目的”和“推动者”，即运动的源泉。而最后的目的和“第一推动者”就是上帝。亚里士多德由此断言，每个物体都有一个“天然处所”。寻找“天然处所”的目的和趋势，支配着各个物体的天然运动，如重物下落、烟焰腾空等等。而一切非天然进行的运动，则只能在别的物体的强迫下才可发生。如上抛的石块，只有不断受到它周围的空气的压迫才可返回它的“天然处所”地面上；当“推一个物体的力不再推它时，物体便归于静止”。这样，在亚里士多德的物理学中，就错误地把力的作用和物体的速度直接联系起来，认为物体的运动速度的有无和大小，是由它是否受力以及力的大小直接决定的；地面上轻重不同的物体下落速度不同，重物下落较快，轻物下落较慢。直到十六世纪以前，亚里士多德的这个唯心主义运动学说一直统治着人们的头脑，严重地阻碍了欧洲力学的发展。

三、伽利略的运动理论

伽利略 (Galileo Galilei, 1564—1642) 是近代动力学理论的奠基者, 1589—1592年他在比萨大学任教时进行了自由落体、抛体运动和物体沿斜面的运动等一系列精密的实验研究, 1590年出版了《运动的对话》一书。1633年受到监禁后重新潜心于力学的研究, 并于1638年发表了《两种新科学的对话》。

这部《对话》也是以三位学者于四天内的谈话形式写的。第一天“关于固体材料的强度问题”。反驳了亚里士多德关于落体的速度依赖于其重量的命题; 第二天题为“关于内聚作用的原因”, 讨论了杠杆原理的证明及梁的强度问题; 第三天讨论了匀速运动和自然加速运动, 构成本书的中心; 第四天是关于抛射体运动的讨论。

我们对伽利略的力学研究工作作一概述。

1、关于运动的描写

经院哲学家们的主要兴趣在于“终极原因”。“所以主要是借助于质料、形式、目的、自然位置等模糊概念对运动作定性的描述。伽利略认为这些都是无用的, 他所要研究的不是运动为什么发生而是怎样发生这就必须将古来关于距离和时间的概念给予确切的数学形式。自伽利略之后, 空间和时间的概念就始终在物理学中具有了本原的和根本的性质。

运动学的第一个问题是描述质点的位置问题。笛卡儿创立了进行这种描述的数学框架——坐标系, 而哥白尼又第一个把坐标系移到太阳上, 从而提出了坐标系的变化对所研究的运动过程的影响问题。伽利略高度评价和论证了哥白尼体系的优越性, 所以科学界一致公认把与太阳系中心相联结的坐标系称为伽利略系。

伽利略确定了这样一个有巨大原则意义的事实: 任何一个相对于伽

利略系处于匀速直线运动的坐标系，在描述力学过程方面同伽利略系完全等效。在《对话》中，他曾精彩地描述过在一个匀速直线运动的船舱里发生的力学现象来论证这个原理。这些是伽利略相对性原理。可以说，如果没有这个原理，物理学的任何重大进展都是不可能的。

2、匀速运动和匀加速运动的定义

伽利略否定了逍遥学派把运动分为自然运动和强迫运动的分类，而从运动的基本特征量速度和加速度出发，把运动分为匀速运动和变速运动两种，这是伽利略迈出的第二步。

他首先定义了匀速运动：“我们称运动是均匀的，是指在任何相等的时间间隔内通过相等的距离”。这表明匀速运动的速度与时间无关，为一常数。但是，非匀速运动的速度却与时间有关，他提出了瞬时速度的概念；物体在给定时刻的速度，就是物体从该时刻起作匀速运动所具有的速度。

如何定义匀加速运动呢？伽利略一度曾想过用物体经过的距离 Δs 而不是用时间 Δt ，将匀 Δt 加速运动定义为速度正比于通过的路程的运动。但他很快发现了这种定义的错误，而选择了用速率的增量 Δv 和用去的时间 Δt 成正比的运动作匀加速运动的定义：

“一个运动被称为匀加速，是指当它从静止出发，在任何相等的时间间隔内有相等的速率增量。”

这就引入了动力学的一个重要概念——加速度。

3、自由落体实验。

伽利略完全相信自由落体运动就是一个匀加速运动，他要设计一个实验来证明这一点。但要直接测定下落物体速度的增加与下落时间是不是成正比，或 $\Delta v / \Delta t$ 是否为常量，那是不容易的，因为瞬时速度和短暂的下落时间都是很难测定的。

于是伽利略转向数学，期望根据他的假设利用数学推导出其他可用当时的仪器直接测定的关系式。他考虑到，如果落体真是匀速的，那么整个下落时间与下落距离应有某种关系，而测量整个下落的时间和距离，当然比较容易了。他得到了关系为

$$\frac{s}{t^2} = \text{常量}$$

这里不包含任何速率，只要测出 s 和 t 就可以了。

但是，物体的自由下落还是太快了，所以伽利略想到要用不太快的运动进行测量。他认为一个光滑圆球在一个光滑斜面上滚下，其加速度虽然小一些，但也应该是常量。于是他进行了著名的斜面实验。从这个实验里，可以得到如下内结果：

① 当斜面倾角固定时，球滚过的距离 s 与所用的时间 t 的平方之比为—常数，即

$$\frac{s_1}{t_1^2} = \frac{s_2}{t_2^2} = \frac{s_3}{t_3^2}$$

② 改变斜面的倾角， s/t^2 的值也随之改变。在测定了一些小的倾角的 s/t^2 之值后，伽利略用外推法认为，对于大的倾角， s/t^2 为常数的这个论断仍然正确。特别当倾角为 90° 而物体作自由下落时这个论断也将成立（他没有得出这个数值）。他由此得出结论：自由落体是匀速运动。

③ 用质量不同的物体沿相同倾角的斜面滚下，发现它们的加速度相等。这就否定了亚里士多德关于轻重不同的物体以不同的速度下落的学说。

实际上，伽利略对亚里士多德的反驳最先是以一个“佯谬”提出的。他论证说：如果亚里士多德的论断成立，即重物比轻物下落速度大，那