第一章　古代的物理教育

(　　—1840)

100多万年以前，从我国领土上有最原始的人群——我们的祖先开始，他们为了自身生存的需要，就必须从事物质资料的生产和进行物质生活。同时，他们需要向下一代传授生产活动和生活的经验，其中包括制造和使用生产工具的经验及进行衣、食、住、行等日常生活习惯的培养和生活能力的训练。众所周知，物理知识广泛存在于生产和生活之中，又与制造和使用生产工具息息相关。所以在传授生产活动和生活经验的过程中，同时也把其中属于物理学内容的知识进行了传授，这就是物理教育的起源。诚然，这时的物理知识是他们的直接经验，其传授是在集体生产和集体生活中以口耳相传、示范模仿的形式进行的，是与生产劳动和实际生活结合在一起的，是直接为当时的生产和生活服务的。

此后，随着生产工具的改良和生产技术的不断进步，物理知识也通过代代相传而不断地积累，不断地丰富。据我国考古工作者的发现，到了中国奴隶社会的殷商时期，青铜器的铸造工艺已大有提高。如殷墟出土的“司母戊大方鼎”就重达875千克，高至104厘米。[①]可见，若当时没有一定的力学和热学知识以及运

①陈梦家，《殷代铜器》，《考古学报》，1954，第7册，第7页。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

用的技能，是绝对制造不出来的。

我国到了 2400 多年前的春秋时期，已有文字可考的含有物理知识的著作——《墨经》，它是墨家进行私学教育的教材，其中，不仅在教学内容上，已有力学、光学等方面的知识，而且在教学方法上，也已运用了自然观察法，这是物理实验的起源。

自周秦以来，中国是一个封建社会，在长达 2000 多年的封建社会里，学校教育也有了进一步的发展。特别在医学、算学、天文、历法等自然科学方面，到唐代已出现了世界上最早的实科学校，这比欧洲 12—14 世纪产生的分科大学，早了 500 多年。[①] 但总的说来，学校教育大都是重人文科学、轻自然科学，尤其是忽视生产知识和生产技术的。从隋炀帝大业二年（606）始置进士科，开始了科举制度，则不论官学、私学、书院，都是普遍地以修习经史等儒家经典为手段，以求取功名为目的，以致到鸦片战争期间，造成了“独是科名声利之习，深入人心，积习难返，士子所岌岌皇皇者，惟是之求”的局面。

由于种种原因，在中国古代，物理学始终没有从哲学、自然科学中分化出来成为一门独立的科学。但是，中国是世界文明古国，在古代，不仅有丰富的科技教育遗产，而且也出现了众多的科学家、发明家和大批的能工巧匠，他们发展了中国古代科技和文化艺术，也曾使中国的科学技术在相当长的一段历史时期内居于世界的领先地位。我们从他们的学说中，可以了解当时的物理知识和教育思想，从他们的创造发明中，也可以有力地印证当时运用物理知识的水平。因此，研究这一方面的内容，在我国物理教育改革向新的广度和深度进发的今天，也有值得借鉴之处。

①中央教育行政学院，《高等教育原理》，北京，北京师范大学出版社，1985，第 28 页。

一、古代的物理知识

在中国古代，尽管物理学始终没能从哲学和自然科学中分化出来成为一门独立的科学，然而在中国历史上，自有教育以来，都从未排斥对科学技术的教育（包括物理知识的教育），即使在中国历来占主导地位的儒学，对我国古代科技教育的发展，也曾起过不可忽视的作用。从中还出现了不少蕴涵着丰富的物理知识的著作，成为中华民族文明史上最宝贵的遗产之一。

中国古代的物理知识，其范围可遍及于力、热、声、光、电磁及物质理论诸方面，但散见于包含有物理知识的哲学、自然科学和科技知识等著作之中，反映于器物，蕴藏于技艺之内，并且在运用中还有许多举世闻名的发明创造。我们今天在追寻物理教育的历史渊源时，不能不看到它们在中国的黄土地上已有最早萌发的绿芽。这里，我们仅对古代在传授物理知识方面比较突出的著作中的主要物理内容及其运用物理知识的典型事例，作一扼要介绍。

1. 古代物理知识的代表作

(1)《墨经》[①]

《墨经》是墨家学派的著作，也是他们进行私学教育的教材。《墨经》是当时自然科学和手工业生产技术知识的光辉记录，是那个时代世界上最伟大的物理学文献之一。这里主要介绍《墨经》中有关力学和光学的知识。

①力学方面

①参阅：孙诒让，《墨子闲诂》，北京，中华书局， 1986。

《墨经》中对时间和空间概念分别作了正确的定义。“久，弥异时也”；“久，合古今旦暮”；“宇，弥异所也”；“宇，东西家南北”。就是说，时间是不同时候的综合，是古、今、晨、昏等具体的时候综合出来的概念；空间是不同地点的综合，是东、西、家、南、北等具体的处所综合出来的概念。其中还提出了参考点“家”。区分了时间和时刻的概念，“时，或有久，或无久。始，当无久”。就是说，时间可分为“持续（有久）的和非持续（无久）的”两种。“开始”则属于“无久”的瞬时的那一种。墨家又把机械运动定义为“动，或（域）徙也”。即是说，运动乃是物体空间位置的变动。

《墨经》中对力的概念提出了初步的论述。“力，刑（形）之所以奋也”。即是说，力是使物体开始运动或加快运动的原因。而且说明物体下落或上举时，都有力的作用。“力，重之谓。下与，重，奋也”。

墨家以桔槔和秤的工作原理为例，总结了杠杆的工作原理，提出了“本”、“标”、“权”、“重”等概念，论述了等臂杠杆和不等臂杠杆的平衡条件，并指出“挈，长重者下，轻短者上”。即杠杆的平衡，不但取决于两物的重量，还与“本”、“标”的长短有关。即墨家认为杠杆平衡的条件：有等臂的，有不等臂的；有改变两端重量使它偏动的，也有改变两臂长度使它偏动的。

墨家还叙述了斜面上的物体失去平衡的道理，以及利用斜面来提升重物的方法。他们曾设计了一种装着轮轴的前低后高的斜面车，称为“车梯”，用来载重物沿斜面不断升高，说明利用斜面和轮轴可以省力。

②光学方面

《墨经》对影的形成作了论述，“景不徙，说在改为”。在《经说》中还进一步阐述“景。光至，景亡；若在，尽古息”。即是说，影是物体阻隔了光源射来的光线造成的，如有光线照到，影就会消逝，若影子仍然存在，则必因障碍物始终没有变

动。当障碍物移动时，看起来影也跟着移动，但实际上只是一种原影不断消失，新影不断生成的连续的物理过程，即影子不断“改为”的过程。这里显然已包含了光线直进的思想。墨家还对本影与半影及影子的大小作了论述。“景二，说在重”。“景之大小，说在迆正、远近”。这两句分别是说，两种阴影区之所以形成，是由于两个光源的光线照射到同一物体上，在物体后面产生的两个阴影区互相重叠的结果。同一物体之影所以会有时大有时小，是由于光线照射于该物体有时斜、有时正，以及光源离物体有时远，有时近的缘故。《墨经》中还第一次记载了针孔成像的实验，“景到，在午有端与景长，说在端”。《经说》：“景，光之人，煦若射。下者之人也高，高者之人也下，足蔽下光，故成景于上，首蔽上光，故成景于下。在远近有端与于光，故景库内也。”即是说，光体通过针孔所成之像为倒立，原因在于光线从针孔（端）交叉通过，光照人，人体反射后犹如箭那样直进，发自人头部的光线，被遮去了上面部分，故成像于下；发自人足部的光线，被遮去了下面部分，故成像于上，在光路的或远或近处存在一个小孔，所以在屏上形成了一个像。

《墨经》中还描述了平面镜成像的规律。“临鉴而立，景倒；多而若少，说在寡区”。讲的是当平面镜横置时，自上俯下成像，自然是倒的。当两个平面镜互相平行相向横置，将重复反射而成多个像，这多个像是全同的，没有区别。对凹面镜与凸面镜成像规律的记载，是《墨经》光学中最精彩的篇章。“鉴洼，景一小而易，一大而正，说在中之外、内”。这是说观察者从远处向着凹面镜走近的过程中，看到自身成像的过程。当人走在球心之外，见到自己的缩小倒像迎面而来；接近球心时，像逐渐模糊以至不辨；当人走在球心和焦点之间，所成之像在人的背后，故无所见；当人走过焦点继续前进时，又见到一个放大的正像。

“鉴团，景一”，说的是凸面镜成像，不论物在哪儿，只有缩小正立的一种像。从上所述，墨家不仅相当系统地研究和传授了几

需要全本请访问 www.ertongbook.com

何光学的知识，得出了精辟的见解和结论，而且在研究和传授中已运用了观察、分析和科学实验的方法。

此外，墨家在战争侦察中曾运用声的共振效应，“令陶者为罂……置井中，使聪耳者伏罂而听之，审知穴之所在”。意思是敌军挖洞攻城，守军在城中挖井，将陶坛放入井中，让听觉灵敏者伏于坛口谛听坛中响声，判断并预先察觉敌人挖坑。

(2)《考工记》[①]

《考工记》是我国先秦古籍之一，是我国现存最古的一部科学技术典籍，也是我国古代一部手工技术规范的汇集。全书所论包括了当时手工业的主要工种，并在论述各种手工技术的同时，还阐述了其科学道理。经分析可以看到在描述每一项手工技术的文字中都包含了一定的物理知识，其中主要是力学和热学知识。

①力学方面

《考工记》对轮子滚动问题作了总结。“凡察车之道，必自载于地者始也，是故察车自轮始。凡察车之道，欲其朴实而微至。不朴实，无以为完久也；不微至，无以为戚速也。轮已崇，则人不能登也；轮已庳，则于马终古登陁也”。即是说察看轮子的要领，必定先从与地面接触的那部分开始，所以看车的好坏先从轮子着眼。轮子的结构是否精密坚固，着地面积是否微小。如果轮子不坚固，就不能耐用；接地不微小，就转动得不快。轮子太高，人不容易登上车；轮子太低，马拉起来就好像经常在上斜坡。根据滚动摩擦理论，滚动摩擦阻力和滚动物体与接触面的变形有关。同时，滚动时的阻力和轮子半径成反比。而且，当轮子太低时，辕与地面成一角度，马不仅要克服摩擦阻力，还要承受部分荷载，当然吃力了。接着又指出，“欲其微至也，无所取之，取之圜”。即要使轮子与地面接触得小，没有其他办法，只有尽量把轮子做成理想圆。在说到如何检验轮子各部分是否做得

①参阅：阮元，《十三经注疏（周礼）》，北京，中华书局，1980。

均匀时，《考工记》记载“：榖辐必齐，平沈必均。”水之以眡其平沈之均也。”这里“水之”，即浸入水中，如果“平沈（即浮沉）”相同，则轮子各部分必定是均匀的，就符合制作轮子的要求了。这是浮力原理在制造轮子中的应用。

《考工记》最早作出了关于物体惯性的论述。“劝登马力，马力既竭，辀犹能一取焉”。意思是说，用马拉车，马已停止用力了，但车还能前进一小段路程。这很显然是对物体惯性的直观描述，这是世界上对惯性现象最早的记载。

《考工记》还有对空气力学应用方面最精彩最集中的记述。“水之，以辨其阴阳。夹其阴阳，以设其比；夹其比，以设其羽；参分其羽，以设其刃。则虽有疾风，亦弗之能惮矣”。这是讲如何确定箭的“括”（箭尾端扣在弦上的尖叉），如何排布羽毛，何处安放箭镞，才能使箭在飞行中不怕风的影响。又说“前弱则俛，后弱则翔；中弱则纡，中强则扬；羽丰则迟，羽杀则趮”。即是说如果箭干前面挠度小，后面挠度大，则飞行中的箭有下垂而偏低之势；如果箭干前面挠度大，后面挠度小，则飞行中的箭有偏高飞翔之势；中间挠度小，两端挠度大，箭的飞行似有回转之势；相反，则有轻飘之势。羽毛太多、太丰厚，箭飞行的速度慢；羽毛太少，零落不齐，箭飞行稳定性差，容易偏斜，射不中的。

②热学方面

《考工记》中论述的热学知识，是很有实际意义的。“凡铸金之状，金与锡，黑浊之气竭，黄白次之，黄白之气竭，青白次之，青白之气竭，青气次之。然后可铸也”。指出冶炼金属时，在加热中先呈暗红色，温度渐高，依次是呈现橙色、黄色、白色，最后是青色。这是因为金属内含有碳、钠一类杂质，不同物质有不同的汽化点，所以可以根据汽化物质的颜色作为判断火候或温度高低的标准，最后达到“炉火纯青”，就可以浇铸了。这一从实践中总结出来的区别冶炼金属程度的实际知识，传之今

日，仍为冶炼工人所利用。

此外，《考工记》中还记述了在制作乐器中，钟声频率的高低、音品与钟的厚薄、钟口的大小的关系。鼓音的响度、音品和鼓的大小、长短的关系等，蕴涵着声学知识的实际应用。

(3)《淮南万毕术》[①]

《淮南万毕术》是西汉淮南王刘安及其门客的作品。书中涉及物理知识的记载不少，现作择要介绍。

①磁学方面

《淮南万毕术》中有关于用磁粉胶合法制作人造磁体的记载。“慈石提棋”。注释说“取鸡(血)磨针铁，以相和慈石，棋头置局上，自相投也。”还有“慈石拒棋”。注释说：“取鸡血与作针磨铁，捣之，以和慈石，用涂棋头，曝干之，置局上，即相拒不休。”在西汉之前，只发现磁石的吸铁性质，这里记载了磁体的相斥现象，确实是一个很大的进步。

②光学方面

《淮南万毕术》记载：“取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。”即是说，应用两个反射面，一个是镜子，一个是水面，光线经过这两个反射面以后，我们在自己的院内便可“坐见四邻矣”。这一记载的基本原理，已与开管潜望镜很相似。这是世界上最早记述的利用光的反射特性制作潜望镜的文字。

书中还有一条记载：“削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生。”这里明确地说出了冰透镜的制法，如何操作取火。而且，特别值得引起注意的是“影”字，当时已观察到冰透镜对日取火时有一个特殊的亮点——“焦点”。这是很有价值的。

我国古代对于冷光光源的应用，首先是照明。《淮南万毕术》中有“萤火却马”的记载，其做法是“取萤火裹以羊皮”。估计是一种聚萤火虫以做照明的透明灯笼。

①参阅：李昉，《太平御览》，北京，中华书局，1960。

③力学方面

《淮南万毕术》中记述了液体表面张力的作用，“首泽浮针”。其注释说：“取头中垢以涂针，塞其孔，置水即浮。”金属针与水原是相浸润的，放在水面极易下沉。当涂上头上的油垢，并堵上针孔时，针与液体互不浸润，针放到液面，接触面呈下凹状，表面张力方向向上，支持了针的重力，针因而可以悬浮于液面。

④热学方面

《淮南万毕术》中有一条记载说：“艾火令鸡子飞。”其注释说：“取鸡子去其汁，燃艾火，内空卵中，疾风，因举之飞。”即在鸡蛋壳下端开小孔，将燃烧着的艾置入卵壳中，壳内温度升高，气体膨胀并向下反冲排出，致使蛋壳脱离地面。就原理而言，把它称做世界上热气球思想的肇始，应该是当之无愧的。

(4)《论衡》①

《论衡》为东汉王充所著，本书内容十分丰富，其所述的物理知识，较之《墨经》已有十分明显的充实和发展。

①力学方面

王充在对物体的运动进行了仔细观察的基础上，指出凭视觉判断物体运动的快慢与观察者的视角差有关。“天行已疾，人去高远，视之若迟。盖望远物者，动若不动，行若不行，何以验之？乘船江海之中，顺风而驱，近岸则行疾，远岸则行迟。船行一实也，或疾或迟，远近之视使然也”。这里直觉地感受到视角差对于观察物体运动快慢的影响。对运动的快慢判别上，还有一段有意义的话“……日昼行千里，夜行千里，骐骥昼日亦行千里。然则日行舒疾，与骐骥之步相似类也。”即是说太阳和千里马运动的快慢是用每昼夜经过的路程来描述的。当太阳和千里马在同一时间内走过相同的路程时，就认为他们运动的快慢相同。反映出王充对物体的机械运动已有了现代物理学中“速率”概念

①参阅：王充，《论衡》，上海，上海人民出版社，1974。

的萌芽。

王充也认识到物体的内力并不对它本身的位置和运动状态起任何作用，而必须依仗外力。“古之多力者，身能负荷千钧，手能决角伸钩，使之自举，不能离地”。就是说一个力大无比的人，即使能身负千钧，折断牛角，拉直铁钩，但他却不能自己把自己举起来而离开地面，也就是“力重不能自举，须人乃举”的力学意义，王充在谈到要使物体的运动状态改变时，已意识到在一定大小的外力作用下，物体的质量越大，改变越难，这可以说是今天称之为牛顿第二定律的发端。“是故车行于陆，船行于沟，其满而重者行迟；空而轻者行疾。……任重，其取进疾速，难矣”。“是故金铁在地，飙风不能动，毛芥在其间飞扬千里”。

王充对物体平衡问题也有独到的论述。“小石附于山，山力能得持之。在沙丘之间，小石轻微，亦能自安。至于大石，沙土不覆，山不能持，处危峭之际，则必崩坠于坑谷矣”。即他认为小石之所以能够在山上平衡，乃是由于山力的支承。而小石轻微，在沙丘上同样也能平衡。大石处在山丘的危峭边际，若山力不能支承，就会坠落于山谷之中。同时对稳定平衡和随意平衡的现象也作了清晰的表述。“圆物投之于地，东西南北无之不可，策杖叩动，才微辄停；方物集地，壹投而止，及其移徙，需人动举”。即是说，把圆球丢到地上，东西南北随意滚动，只有用棍子去制止它时，才有瞬间的静止。而方形的物体放在地面上，一放下去就立刻静止在那儿，如果要让它移动，就必须施加外力才行。前者是随意平衡，后者是稳定平衡的典型例子。

②热学方面

王充对热的传导提出了自己的解释。“夫近水则寒，近火则温，远之渐微，何则，气之所加，远近有差也”。王充认为热的传导是“气”的作用，近火温是因为距离短，“气”的作用大，当距离增大时，“气”的作用减小，热的传导也微弱了。王充对雨露霜雪形成的解释，已注意到了蒸发、凝结与温度的关系。

“雨从地上，不从天下，见雨从上集，则谓从天下矣，其实地上也。……夫云则雨，雨则云矣。初出为云，云繁为雨……云雾，雨之征也。夏则为露，冬则为霜。温则为雨，寒则为雪。雨露冻凝者，皆由地发，不从天降也”。又说：“寒不累时，则霜不降。温不兼日，则冰不释。”王充对雨露霜雪的形成已作出了较为科学的解释，其观察是十分细致的，分析是十分深入的，推理是十分严密的。这种运用观察、分析的方法，即使对于今天的物理教学和科学研究，都是很有指导意义的。

③声学方面

王充已认识到人的言语发声的机制。“生人所以言语吁呼者，气括口喉之中，动摇其舌，张歙其口，故能成言。譬犹吹箫笙，箫笙折破，气越不括，手无所弄，则不成音。夫箫笙之管，犹人之口喉也；手弄其孔，犹人之动舌也”。这里，王充将人的口喉与箫笙之管比拟，舌与手按管孔比拟，说明人之所以能发声言语，是由于气在口喉中振动而形成的。对于声音的传播，他在《论衡》中说：“天之去人，高数万里，使耳附天，听数万里之语，弗能闻也。……鱼长一尺，动于水中，振旁侧之水，不过数尺，大若不过与人同，所振荡者不过百步，而一里之外澹然澄静，离之远也。今人操行变气远近，宜与鱼等；气应而变，宜与水均。”王充明确地说明声音是由于气的振荡所致，并且需借助媒介——气来传播，声音的传播是有一定范围的，和鱼在水中所引起的振荡的传播一样，距振荡处较远的地方就达不到了。因此他认为，人离天甚远，因此人的声音天上是听不到的。这里运用了类比的方法，这种方法，在今天的物理教学中也是常用的。

④电磁方面

我国古代关于静电现象的记载，往往与磁现象相并列。西汉末年成书的《春秋纬·考异邮》中就有“慈石取铁，玳瑁吸褡”的说法。王充对此现象作了进一步的阐发：“顿牟掇芥，磁石引针，皆以其真是，不假他类。他类肖似，不能掇取者，何也？气

需要全本请访问 www.ertongbook.com

性异殊，不能相感动也。”顿牟即今日的琥珀，是一种绝缘体，故经过摩擦带电就能吸引芥子一类轻小物体。王充把静电现象与磁现象联系起来。并用“气”加以统一的解释。

王充还驳斥“雷为天怒”的观点，提出“夫雷之发动，一气一声也”。认为雷电与云雨有关，“云雨至则雷电击”，是阴阳二气斗争的表现。并列举出 5 项证据。说明雷电在本质上是火，“雷者，火也”。可见，王充已认识到雷电也是物质的，是自然界的一种变化现象。

《论衡》中第一次较详细地记述了中国早期的指南仪器——司南的形状和构造，并说明了它的指极性。“司南之杓，投之于地，其柢指南”。就是说，司南这种磁性的勺子，放在一个有刻度的金属盘上，静止时磁勺的柄将指向南方。

(5)《梦溪笔谈》①

《梦溪笔谈》是北宋中期的政治家和科学家沈括的著作。著名的英国科技史家李约瑟认为沈括是“中国整部科学史中最卓越的人物”，《梦溪笔谈》是“中国科学史上的里程碑”。

《梦溪笔谈》这一举世闻名的科学巨著，内容所涉领域十分广泛，在物理知识方面，主要是生动地记述了磁学、光学和声学知识。

①磁学方面

沈括对磁学有特殊的贡献。《梦溪笔谈》中记载了人工磁化的方法：“以磁石磨针锋，则锐处常指南，亦有指北者，恐石性亦不同……”即用天然磁石磨钢针，利用磁石的磁场，使钢针显出磁性。并推断磁针之所以有指南和指北的分别，可能是石性不同的缘故，这个推断原则上是对的。

沈括对指南针作了独到的研究。“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。水浮多荡摇。指爪及碗唇上皆可

①参阅：胡道静，《梦溪笔谈校注》，上海，上海古籍出版社，1987。

为之，运转尤速，但坚滑易坠，不若缕悬为最善。其法取新纩中独茧缕，以芥子许蜡，缀于针腰，无风处悬之，则针常指南。其中有磨而指北者。予家指南、北者皆有之。磁石之指南，犹柏之指西，莫可原其理”。这一记载包括几项内容：磁针的人工磁化；发现了地磁偏角；介绍了磁针的四种支挂方法，其中以“缕悬为最善”。沈括发现地磁偏角，比哥伦布于 1492 年横渡大西洋时观测到地磁偏角，还要早 400 多年。而沈括所采用的缕悬法支挂小磁针，今天也仍在采用。

《梦溪笔谈》还记载了将磁石捣碎投水井中，成磁化水，“每日汲水饮……久极益人”。即已知道磁化水的健身作用和药用。

②光学方面

在《梦溪笔谈》中，有许多光学方面的观察和实验记录及其分析。沈括对日蚀、月蚀的成因作了理论总结，并用模拟演示实验来验证月亮圆缺的科学道理。“……如一弹丸，以粉涂其半，侧视之，则粉处如钩，对视之，则正圜”。

沈括对光线直线进行和小孔成像及凹面镜成像结合起来进行研究。“阳燧照物皆倒，中间有碍故也。算家谓之‘格术’。如人摇橹，桌为之碍故也。若鸢飞空中，其影随鸢而移；或中间为窗隙所束，则影与鸢遂相违，鸢东则影西，鸢西则影东。又如窗隙中楼塔之影，中间为窗所束，亦皆倒垂，与阳燧一也。阳燧面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒。其无所见处，正如窗隙、橹臬、腰鼓碍之，本末相格，遂成摇橹之势。故举手则影愈下，下手则影愈上，此其可见。（阳燧面洼，向日照之，光皆聚向内。离镜一二寸[①]，光聚为一点，大如麻菽，著物则火发，此则腰鼓最细处也。）”沈括在这里不但把运动物体(鸢)通过针孔所成之像方向的相反跟静物(楼、塔)通过针孔所成之像的倒立联系起来，认为这两个现象在本质上是相同的，还把

① 1 寸约合 3.33厘米。

针孔成像与凹面镜成像联系起来，指出了这两者属于同一类的成像。接着用实验的方法，对凹面镜成像的几种情况进行了研究：手指从镜面开始向外移出，先见到正立的虚像，将近焦点时，像无所见，过焦点，就成为倒立的实像，并且还特别指出“无所见处”就是“窗隙”、“橹臬”之所在。这就是“碍”，而且正是成像中物上像下，物下像上的原因。针孔成像中，针孔即是“碍”；凹面镜成像中，焦点是“碍”。文中明确地阐述了焦点的位置、大小、特征。文中提到的“格术”一词，沈括未作解释。近年有学者认为这里的格术是一种“数学物理方法”。[①]沈括从光线的角度进行成像分析，其理论高度是以往所没有达到的。

《梦溪笔谈》中还对我国的一种古铜镜——透光镜的透光原理，作出了精辟的分析，从传世的透光镜看，现存的有西汉时期的透光镜，《太平广记》一书中有隋唐之际王度的《古镜记》，说透光镜“承日照之，则背上文画，墨人影内，纤毫无失”。这是一种背面有图文的特制铜镜，在阳光照射下，镜面反射的光射到墙上，会出现跟镜背图纹相应的花纹，十分清晰，好像从背后透过来一样，十分奇妙。对透光镜的透光机理，就目前所知，最早始于沈括等人。“世有透光鉴，鉴背有铭文，凡二十字，字极古，莫能读。以鉴承日光，则背文及二十字，皆透在屋壁上，了了分明。人有原其理，以为铸时薄处先冷，惟背文上差厚，后冷而铜缩多，文虽在背，而鉴面隐然有迹，所以于光中现。予观之，理诚如是。然予家有三鉴，又见他家所藏，皆是一样，文画铭字无纤异者，形制甚古，惟此一样光透，其他鉴虽至薄者皆莫能透。意古人别自有术”。沈括分析透光机理，认为铭文处铸得较厚，冷却时间长，收缩较大；无铭文处较薄，冷得较快，收缩较小。由于这种收缩率的差异，在镜的正面形成了一幅与背面花纹相对应的痕迹，这种痕迹极为细微，人眼不能识别。当在阳光

①李志超等，《中国古代光学的格术·物理》，*1985*，第 *14* 卷第 *12* 期，第 756 页。

下反射光束时，由于长光程的放大效应，就在光影中显现出来了。但他比较了许多镜，并非都能透光，对此他审慎地提出“古人别自有术”。1975 年，复旦大学采用淬火后抛光的方法①，上海交通大学采用铸磨法②，都成功地复制了透光镜，彻底地揭开了中国古透光镜的奥秘。

③声学方面

《梦溪笔谈》中阐述的声学知识，包括关于乐律，古乐钟的发声，古琴的制作和传声、共鸣等等。书中记载了一个作者精心设计的共振实验，验证了差八度音时两弦的谐振现象，由于弦振动比较微弱，不易观察，他剪了一些小纸人放在弦上做试验，现象非常直观。书中写道：“琴瑟弦皆有应声：宫弦则应少宫，商弦则应少商，其余皆隔四相应。今曲中有声者，须依此用之。欲知其应者，先调诸弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。声律高下苟同，虽在他琴鼓之，应弦亦震，此之谓正声。”这里沈括发现了共振可以发生在振数比为 1/2(宫与少宫，商与少商）、2/3(隔四相生）等处，而且其研究方法，在西方，直到 1677年，牛津的诺布尔和皮戈特才首次使用“纸游码”演示弦线共振。值得指出的是，沈括的这个用简单的仪器来证明弦线的基音与泛音共振关系的实验，十分形象、生动，若用于教学，更会引起学生学习物理的兴趣。

对于空腔扩音技术，沈括的研究也是很有意义的。《梦溪笔谈》中记载：“古法以牛革为矢服，卧则以为枕，取其中虚，附地枕之，数里内有人马声，则皆闻之，盖虚能纳声也。”这里，牛皮做的空心箭袋枕于地上，起到了气腔共振的作用。沈括这种对知识应用于实际事例的重视，对我们今天进行物理教育，是值得

①上海博物馆、复旦大学光学系，《解开西汉古镜“透光”之谜》，《复旦学报》，1975，第 3期，第 1页。

②上海交通大学西汉古铜镜研究组，《西汉“透光”古铜镜研究》，《金属学报》，1976，第 1期，第 13页。

借鉴的。而且他对这种应用的解释，也是符合现代科学道理的。

（6）《革象新书》[①]

《革象新书》是宋末元初重要的科学家赵友钦的著作。他在书中对光学现象作出了比较深入的研究和详细的描述，其中最精彩的是用自行设计的大型实验对小孔成像所进行的研究，得到了小孔成像的规律。

从实验知道，光通过小孔时，不论孔的形状如何，屏上得到的光斑总是发光物的像。当孔相当大时，则屏上得到的光斑形状随孔的形状而定，孔方则方，孔圆则圆。他对这个现象的解释是："罅小则不足容日月之体，是以随日月之形而皆圆。及其缺则皆缺。""罅大而可容日月之体也。"说明了小孔成像与孔的大小有关。

为了证明这个结论，赵友钦设计了一个完备而大型的实验。他把一个二层楼房作为实验室，在楼下的两间房子的地面上各挖一个直径为四尺[②]多的圆井，右边井深为四尺，左边井深为八尺，在左边井里放一张四尺高的桌子，在左井桌上和右井井底各放一块密插 1000 多支蜡烛的圆板作为光源，把它们看做太阳或月亮。在楼板上各有一小方孔，左边孔宽约一寸，右边孔宽约半寸。他的这种设计考虑是很周密的。他用相邻两个房间而楼板上开孔大小不同，就是为了对比；他把作为光源的蜡烛放在井内，就可以使烛焰比较稳定；井开得相当大，就可以放得下 1000 多支蜡烛，使光源足够明亮；楼板上孔是较小的方形，可以看到出现的像是圆形，证明像的形状与小孔的形状无关，只是孔较大的较明亮，孔较小的较暗淡。但光源的形状如果改变，像的形状也必定随着改变，例如，熄灭一半蜡烛，光源变成一个半圆形时，

①参阅：赵友钦，《革象新书·四库全书珍本初集子部卷五》，北京，商务印书馆，1934—1935。

②这是宋代的尺度，若以"营造尺"计，1尺约合 30.91厘米。

像也缺了一半，烛盘缺左半，像缺右半；烛盘缺右半，像缺左半。证明了小孔成的像是倒像。如果撤去左井内小桌，把烛盘放在井底，也就是增大了光源与小孔之间的距离（物距），则天花板（像屏）上的像就缩小，而亮度却增加了。另用两块大木板挂在天花板之下数尺处作为像屏，即减小了像距，这时得到较小而较亮的像。最后，赵友钦还指出，实验时像屏不可倾斜，否则得到的像“圆而长”，即成为椭圆状。这样的实验设计，可以说是考虑得十分周密、十分全面，研究得十分深入。

经过这样一系列周密的观察实验以后，赵友钦指出：“凡景近窍者狭，景远窍者广。烛远窍者景亦狭，烛近窍者景亦广。景广则淡，景狭则浓，烛虽近而光衰者，景亦淡；烛虽远而光盛者，景亦浓。由是察之，烛也、光也、窍也、景也四者消长胜负皆所当论者也。”即是说物距、像距、光源强度和孔窍都影响像的大小与浓淡。赵友钦的这些正确论断，西方直到 16 世纪末才由开普勒得出。

还值得指出的是赵友钦在进行上述小孔成像的研究中，采用的实验步骤，即只改变孔的大小；只改变光源的形状；只改变物距；只改变像距；只改变孔在物、像间的位置，即同时改变物距和像距等等，都是确定一个因素作为研究对象，而将其他因素控制不变的实验方法，至今仍为物理教学所广泛采用。

(7)《律学新说》①

《律学新说》是明代乐律理论家朱载堉的一部重要著作。

乐律是音乐演奏中各乐音在频率高低上所遵循的规则或体系，律学的形成，是音乐实践中审美感觉与数理解析相结合的产物，它指导着音乐的实践、乐器的制作。

在我国，早在周初，就有了在一个音阶中确定的十二个律，并在十二律中选取五个或七个音组成一个音阶的乐制。大约在春

①参阅：冯文慈点注，《律学新说》，北京，人民音乐出版社， 1986。

需要全本请访问 www.ertongbook.com